

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Technologie elektroerozivního drátového řezání

Technology Wire Electrical Discharge Machining

Student: Bc. František Špalek
Vedoucí diplomové práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petruš, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. František Špalek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Technologie elektroerozivního drátového řezání**
Technology Wire Electrical Discharge Machining

Zásady pro vypracování:

1. Obecný rozbor nekonvenční technologie elektroerozivního drátového řezání.
2. Stávající stav a možnosti využití technologie elektroerozivního drátového řezání.
3. Návrh experimentální části práce.
4. Zpracování naměřených dat.
5. Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HAVRILA, M.; ZAJAC, J.; BRYCHTA, J.; JURKO, J. *Top trendy v obrábění, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o Žilina, 2006. s. 205. ISBN 80-968954-2-7.
[2] MAŇKOVÁ, I. *Progresivní technologie*. Košice : Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-43.
[3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábění*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
[4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

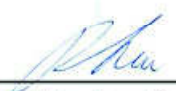
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

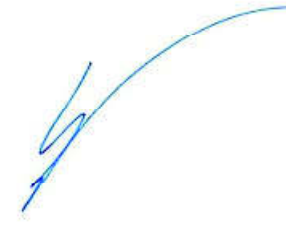
Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Mistopřisečné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. 5. 2015



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18. 5. 2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. František Špalek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Velké Karlovice 648, 756 06

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠPALEK, F. *Technologie elektroerozivního drátového řezání : diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 87 s. Vedoucí práce: Petřů, J.

Diplomová práce popisuje a srovnává nekonvenční technologii obrábění elektroerozivního drátového řezání. V úvodu práce je popsán princip technologie. Dále byly navrženy technologické parametry pro řezy v hliníkové pěně a celistvé hliníkové slitině. Pro potřeby mechanických zkoušek byly vyřezány válečky průměru 22 mm. Válečky a otvory byly po řezech změřeny a zkoumány elektronovým mikroskopem. Hliníková pěna byla podrobena testům průmyslovou rentgenovou počítačovou tomografií. Z naměřených dat byly určeny závislosti na řezech v hliníkové pěně mezi oblastmi s řidším a hustším výskytem pórů a celistvém hliníku. Nakonec byly porovnány náklady na řezy v hliníkové pěně a kompaktního hliníku.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŠPALEK, F. *Technology Wire Electrical Discharge Machining: Master Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, assembly and engineering metrology 2015, 87 p. Thesis head: Petřů, J.

This master thesis describes and compares unconventional machining technology of electrical discharge machining. The introduction describes the principle of technology. Then technological parameters have been suggested for cutting in aluminum foam and solid aluminum alloy. Rollers with 22 mm diameters have been cut for mechanical tests. The rollers and the holes are have been measured and examined by electron microscopy. Aluminum foam was subjected to tests of industrial X-ray computer tomography. Measured data have been used to determinate dependencies between sections in aluminum foam with thinner and thicker appearance of pores and solid aluminum. Finally machining costs in aluminum foam and solid alloy have been compared.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
ÚVOD	12
1 OBECNÝ ROZBOR NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE	
ELEKTOREROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ.....	13
1.1 Úvod do nekonvenčních metod obrábění.....	13
1.2 Elektroerozivní technologie obrábění	15
1.2.1 Princip metody EDM.....	16
1.2.2 Parametry metody EDM.....	16
1.2.3 Pracovní kapaliny	20
1.2.4 Nástrojové elektrody.....	21
1.2.5 Výhody a nevýhody EDM.....	22
1.3 Princip WEDM.....	23
1.3.1 Drátové elektrody	25
1.3.2 Dielektrikum	26
2 STÁVAJÍCÍ STAV A MOŽNOSTI VYUŽITÍ TECHNOLOGIE	
ELEKTREROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ.....	27
2.1 Využití elektroerozivního drátového řezání v RMTVC.....	27
2.2 WEDM v laboratoři – CHMER G32F	28
3 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE.....	31
3.1 Návrh experimentu - Použité materiály řezání.....	31
3.1.1 Hliníková pěna ALPORAS.....	31
3.1.2 Celistvý hliník.....	33
3.2 Realizace experimentu	35
3.2.1 Řezy Al pěny	36
3.2.2 Řez celistvého hliníku.....	41
3.2.3 Zkouška řezu Al pěny vodním paprskem	44
3.3 Měření součástí	46
3.3.1 Rozměry měření průměrů válečků / otvorů	46
3.3.2 Měření pórovitosti Al pěny.....	51
3.3.3 Snímání povrchu elektronovým mikroskopem.....	53
3.3.4 Měření drsnosti celistvého hliníku.....	59

4 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	62
4.1 Objem pórů.....	62
4.2 Zpracování rozměrů průměrů válečků	64
4.2.1 Zpracování průměrů válečků Al pěny	64
4.2.2 Zpracování průměrů válečků celistvého Al	67
4.2.3 Porovnání průměrů válečků Al pěny a celistvého Al	70
4.3 Porovnání rozměrů průměrů otvorů	71
4.3.1 Porovnání otvorů Al pěny	71
4.3.2 Zpracování otvoru celistvého Al	72
4.4 Porovnání technologických parametrů.....	75
4.4.1 Rychlost posuvů pro jednotlivé řezy v_f	75
4.4.2 Porovnání časů řezů válečků	76
4.4.3 Porovnání spotřeby drátu	77
4.4.4 Porovnání stability jiskrové mezery GAP	77
4.5 Vyhodnocení drsnosti povrchu celistvého Al	78
5 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	80
5.1 Výrobní náklady válečku /otvorů.....	81
ZÁVĚR.....	83
POUŽITÁ LITERATURA.....	85
SEZNAM PŘÍLOH.....	87

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

AC	–	střídavý proud	[A]
AJM	–	opracování proudem abraziva obsáhnutém v proudu vysokorychlostního stlačeného plynu	[-]
AFF	–	ochrana vypínacího času	[-]
AFM	–	opracování proudem abraziva	[-]
AN	–	ochrana zapínacího času	[-]
AVR	–	automatická stabilizace přívodu elektrického proudu ze sítě	[-]
AWJM	–	technologie obrábění vodním paprskem s abrazivem	[-]
AWT	–	automatický systém návleku drátu	[-]
BSED	–	metoda zpětně odražených elektronů	[-]
CAD	–	počítačem podporovaný návrh	[-]
CAM	–	počítačem podporovaná výroba	[-]
CNC	–	počítačem číslicově řízený stroj	[-]
CM	–	chemické obrábění	[-]
CT	–	počítačový tomograf	[-]
CW	–	korekce drátu programově	[mm]
ČSN	–	Česká státní norma	[-]
D	–	průměr válcového filtru	[mm]
DIN	–	německý institut pro normalizaci	[-]
DC	–	stejnosměrný proud	[A]
D_C	–	průměr celistvého hliníkového válečku	[mm]
D_{Cmax}	–	maximální průměr hliníkového válečku	[mm]
D_{Cmin}	–	minimální průměr hliníkového válečku	[mm]
D_{CO}	–	průměr otvoru celistvého hliníku	[mm]
D_P	–	průměrná hodnota průměrů válečků hliníkové pěny	[mm]
D_{PO}	–	průměrná velikost průměru otvoru hliníkové pěny	[mm]

D_{Pmax}	–	maximální hodnota průměrů válečků hliníkové pěny	[mm]
D_{Pmin}	–	minimální hodnota průměrů válečků hliníkové pěny	[mm]
D_{VP}	–	průměrná hodnota průměrů válečků hliníkové pěny ve velkých pórech	[mm]
D_{MP}	–	průměrná hodnota průměrů válečků hliníkové pěny v malých pórech	[mm]
D_{PWOS}	–	průměrná velikost průměru hodnot pro AWJM metodou multipass	[mm]
D_{PWOM}	–	průměrná velikost průměru hodnot pro AWJM metodou standard	[mm]
EBM	–	obrábění elektronovým paprskem	[-]
ECG	–	elektrochemické broušení	[-]
ECM	–	elektrochemické obrábění	[-]
EDM	–	elektroerozivní obrábění	[-]
EN AW	–	mezinárodní označení hliníkových slitin	[-]
F	–	konstantní posuv stroje	[mm·min ⁻¹]
FR	–	citlivost serva	[V]
FM	–	servo mód	[-]
GAP	–	stabilita jiskrové mezery	[V]
H ₂	–	molekulový vodík	[-]
HS	–	hodinová sazba stroje	[Kč · h ⁻¹]
IBM	–	obrábění iontovým paprskem	[-]
ISO	–	mezinárodní organizace pro normalizaci	[-]
LBM	–	technologie obrábění laserem	[-]
L	–	délka odvinutého drátu / spotřeba drátu	[mm]
MS	–	Microsoft	[-]
NC	–	číslicově řízený	[mm]
NMO	–	nekonvenční metoda(y) obrábění	[-]
OFT.	–	korekce elektroerozivního drátového řezání	[mm]
OFF	–	vypínací čas	[ms]

ON	–	zapínací čas	[ms]
OV	–	zapalovací napětí	[V]
PBM	–	technologie obrábění plazmou	[-]
PCM	–	fotochemické obrábění	[-]
PW	–	typ generátoru	[-]
Ra	–	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Rq	–	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Rz	–	největší výška nerovností profilu	[μm]
RMTVC	–	Regionální materiálově technologické výzkumné centrum	[-]
RTG	–	rentgen	[-]
Rm	–	mez pevnosti	[MPa]
SAV	–	Slovenská akademie věd	[-]
SC	–	technologie	[-]
SE	–	metoda sekundárních elektronů	[-]
SEM	–	rastrovací elektronový mikroskop	[-]
SK	–	slinutý karbid	[-]
SiC	–	karbid křemíku	[-]
Si ₃ N ₄	–	nitrid křemičitý	[-]
SV	–	napětí serva	[V]
TiH ₂	–	titan hydrid	[-]
U	–	elektrické napětí	[V]
USM	–	obrábění ultrazvukem	[-]
VP2	–	výzkumný program dva	[-]
WEDM	–	elektroerozivní drátové řezání	[-]
WF	–	odvin drátu	[mm · s ⁻¹]
WJM	–	technologie obrábění vodním paprskem	[-]
WL	–	frekvence čerpadla výplachu	[Hz]
WT	–	napnutí drátu	[g]

cca	–	přibližně	[-]
d	–	vnitřní průměr filtračního válce	[mm]
hm %	–	hmotnostní koncentrace prvků	[%]
m	–	hmotnost	[kg]
n	–	počet měření	[-]
s	–	velikost dráhy řezu	[mm]
s(\bar{x})	–	výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru	[mm]
t	–	čas řezání	[min]
u _A	–	standardní nejistota typu A	[-]
u _B	–	standardní nejistota typu B	[-]
v _f	–	průměrná rychlost posuvu	[mm · min ⁻¹]
vyp.	–	značka vypnuto	[-]
\bar{x}	–	výběrový průměr	[mm]
zap.	–	značka zapnuto	[-]
ρ	–	hustota	[kg · m ⁻³]
Ø	–	průměr	[mm]

ÚVOD

První, kdo zaznamenal krátery vznikající pomocí výbojů na plochách ležících proti vodivým deskám, byl v roce 1768 fyzik Joseph Priestley.

V praxi se první využití technologie elektroerozivního drátového řezání datuje do let 1938 až 1944 sovětským inženýrům manželům Lazarenkovým. Průmyslové rozšíření se datuje v letech 1950 až 1954, kdy se při prvních výstavách objevily první elektrojiskrové stroje.

Z názvu „nekonvenční technologie obrábění“ vyplývá, že se jedná o netradiční způsob, i když se nejedná o novou technologii. Tato technologie se v průběhu let rozvinula do několika metod, které se od sebe liší především svými fyzikálními účinky v procesu obrábění.

Díky nízké produktivitě či použitelnosti při obrábění některých nových materiálů konvenčními způsoby se až v posledních 20let se technologie elektroerozivního obrábění začlenila mezi konkurenceschopné metody ke konvenčnímu obrábění. Zvýšila se tak produktivita a hospodárnost při obrábění zápustek, řezných nástrojů ze slinutých karbidů a speciálních nástrojových ocelí. [1; 3; 6]

Hlavním cílem diplomové práce je zjistit, zda lze obrábět hliníkovou pěnu tak, aby nedošlo k destrukci pórů následkem upnutí a řezu. Vyřezat pro potřeby mechanických zkoušek z Al pěny válečky $\varnothing 22^{+0,1}_{-0,05}$ mm délky 33 mm. Dále pak porovnat elektroerozivní řezání mezi řezy v Al pění a kompaktním hliníkem.

1 OBECNÝ ROZBOR NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE ELEKTOREROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ

Základem každé nekonvenční metody obrábění (NMO) je fyzikální princip díky, kterému dochází k odebírání materiálu. Nepoužívá se běžný řezný nástroj s definovanou geometrií jak u obrábění klasického (soustružení, frézování, hoblování, apod.) a netvoří se standardní tříška. [2; 6]

1.1 Úvod do nekonvenčních metod obrábění

Systematicky se NMO klasifikují podle:

- a) hlavního energetického zdroje úběru materiálu
- b) přítomnosti „nástroje“ - tělesa udávajícího tvar
- c) převládajícího mechanismu úběru materiálu

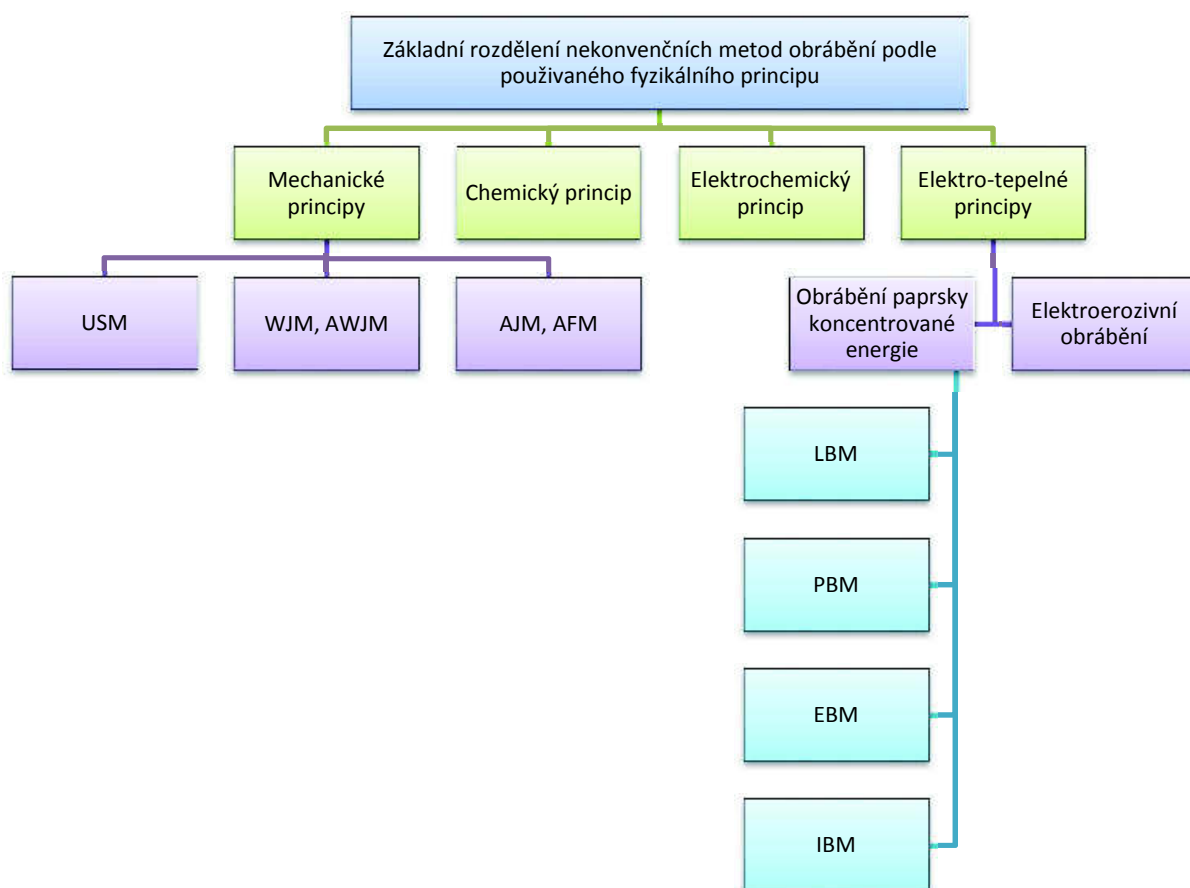
ad a) Dělení podle hlavního energetického zdroje rozděluje technologie do hlavních skupin podle energie, díky které dochází k úběru materiálu, a to na:

- mechanické procesy,
- chemické procesy,
- elektrické / elektrochemické procesy,
- tepelné / elektrotepelné procesy.

ad b) Přítomnost „nástroje“, neboli tělesa, kdy se o nástroji hovoří ve všeobecném slova smyslu, který je příčinou úběru materiálu, jako např.: drátová elektroda, paprsek laseru paprsek vody aj. Tento pomyslný nástroj oproti konvenčním metodám obrábění nebývá v přímém kontaktu s obráběným materiálem, ale pouze udává tvar geometrie dutiny vznikající pomocí některého z energetických procesů.

ad c) Rozdělení technologií podle hlavního způsobu rozkladu materiálu ve směru pohybu nástroje:

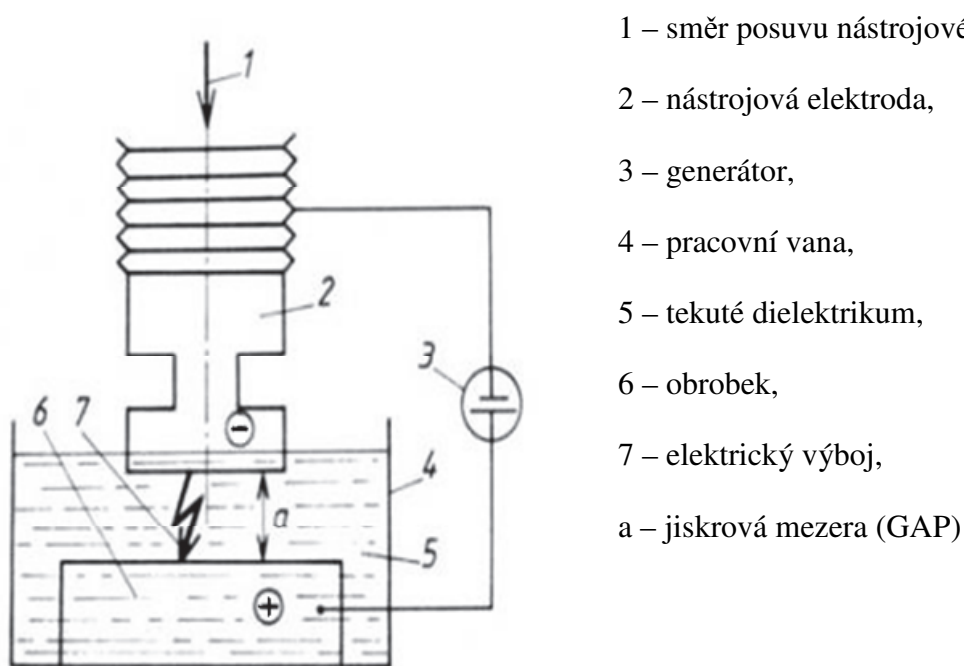
- technologie s převládajícími abrazivními účinky – obrábění ultrazvukem (USM), obrábění proudem brusiva (AJM, AFM)
- obrábění s erozivním účinkem vodního paprsku (WJM, AWJM)
- procesy založené na principu chemického rozpouštění materiálu: chemické frézování (CM), fotochemické obrábění (PCM), elektrochemické obrábění (ECM), elektrochemické broušení (ECG)
- obrábění pomocí tepelného účinku: elektroerozivní obrábění (EDM), elektrojiskrové řezání (WEDM), obrábění paprskem laseru (LBM), obrábění paprskem plazmy (PBM), obrábění paprskem elektronů (EBM), obrábění paprskem iontů (IBM) [1; 6; 9]



Obr. 1.1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění [2]

1.2 Elektroerozivní technologie obrábění

Zkráceně EDM z anglického výrazu pro metodu Electro – Discharge Maschining. Je souhrn několika metod založených na fyzikálním principu elektrotrotermické eroze, která probíhá mezi katodou (nástrojová elektroda) a anodou (obrobek) v dielektriku, viz Obr. 1.2 [1]



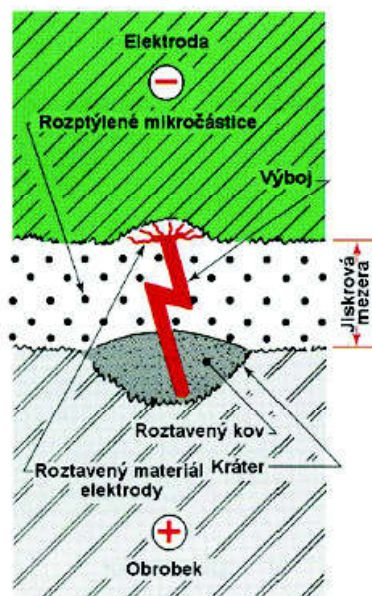
Obr. 1.2 Princip elektroerozivního obrábění [2; 1]

Mezi tyto metody patří:

- Elektrojiskrové hloubení, děrování a řezání
- Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou
- Elektrojiskrové děrování – výroba mikro otvorů
- Elektrojiskrové leštění
- Elektrojiskrové povlakování
- Elektrojiskrová tvorba textu
- Elektroimpulzní obrábění
- Elektrokontaktní obrábění [2]

1.2.1 Princip metody EDM

Elektrická eroze vzniká působením výbojů v místech na povrchu elektrody a obrobku (všechny elektricky vodivé materiály). Elektrody jsou připojeny ke zdroji stejnosměrného napětí. Stěžejním elementem proudu jsou elektricky nabitě částice, ionty a elektrony vznikající jako výsledek ionizace plynu mezi kladnou a zápornou částí soustavy. Nabitě částice získávají v elektrickém poli jiskrové mezery pohybovou energii, která spolu s vzájemným pohybem elektrod odevzdává na jejich povrch. V tomto důsledku dochází ve výboji k přeměně elektrické energie na tepelnou, díky kterému dojde k úběru materiálu. V místě výboje na povrchu obrobku se materiál velmi prudce ohřívá, taví a také částečně odpařuje. Tlakem kovových par vzniklých při této tepelné reakci se mikročástice vymršťují do prostoru jiskrové mezery. Vzniká tak kráter, jehož parametry jsou závislé na mnoha faktorech, viz Obr. 1.3 detail výboje. [1; 2]



Obr. 1.3 Detail výboje mezi nástrojem a obrobkem [2; 8]

1.2.2 Parametry metody EDM

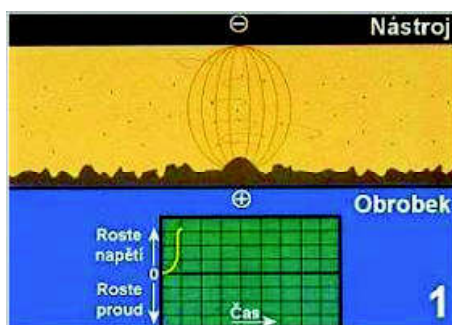
Charakteristickými znaky EDM obrábění jsou odvislé od: režimu obrábění, druhu elektrod (obrobku a nástrojové elektrody) a nejčastěji dielektrika. Důležitou roli hraje také doba vypnutí – čas přerušení výboje, který musí být delší než deionizace kapaliny v prostoru okolo výboje.

Mezi hlavní parametry EDM jsou:

- napěťové impulzy 10 až 300 V,
- frekvence 0,2 až 500 kHz,
- jiskrová mezera 0,01 až 0,5 mm,
- lokální teploty až 12 000 °C,
- koncentrace energie 10^5 až 10^7 W · mm⁻²,
- kráter velikosti 10^{-3} až 10^{-5} mm³,
- měrná spotřeba energie 0,1 až 1,0 kWh · cm⁻³ [2; 1]

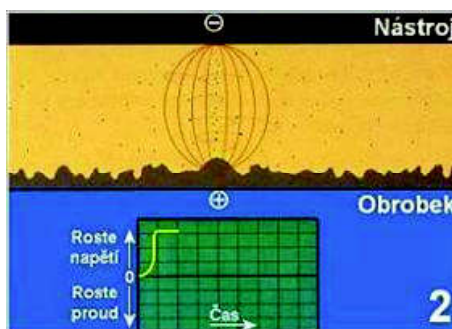
Komplexní průběh výboje mezi nástrojem a obrobkem:

Krok 1.: V nejbližších bodech mezi obrobkem a nástrojem dosahuje napětí maximálního gradientu, kde se začnou shlukovat elektricky vodivé částice v dielektriku (nečistoty), proud je nulový, viz Obr. 1.4. [1; 2]



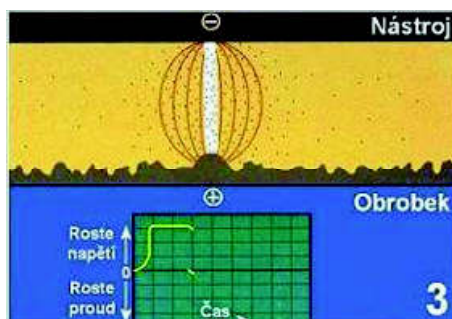
Obr. 1.4 Krok 1. [2]

Krok 2.: Roste počet ionizovaných částic, napětí je na maximu, izolační vlastosti dielektrika v tomto místě klesají a vytváří se tak můstky pro zapálení výboje, stále je ale dostatečně velký odpor a v tomto místě neprotéká mezi nástrojem a obrobkem elektrický proud, viz Obr. 1.5. [1; 2]



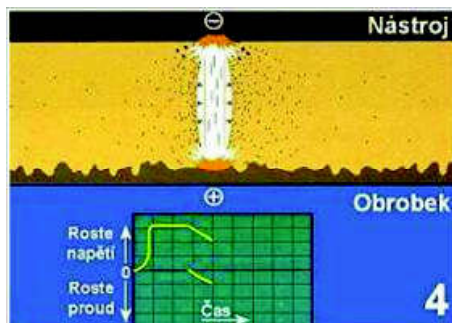
Obr. 1.5 Krok 2. [2]

Krok 3.: Dochází k uvolňování elektronů ze záporně nabité elektrody, které se sráží s neutrálními částicemi. Kapalina v tu chvíli přestává být izolátorem a daným místem začíná protékat elektrický proud, díky kterému může začít klesat napětí, viz Obr. 1.6. [1; 2]



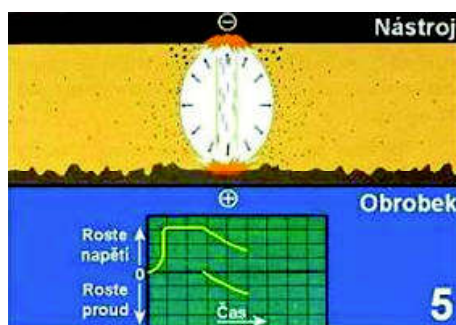
Obr. 1.6 Krok 3. [2]

Krok 4.: Díky rostoucímu elektrickému proudu může nadále klesat napětí a proto narůstá teplota obrobku i elektrody. Dochází k postupnému odpařování částiců a začíná mezi nimi k tvorbě plazmového jiskrového kanálu, viz Obr. 1.7. [1; 2]



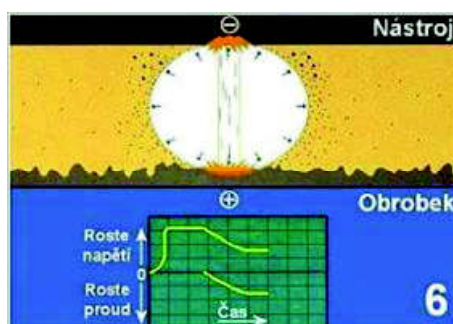
Obr. 1.7 Krok 4. [2]

Krok 5.: Vytvořená bublina par má tendenci expandovat, avšak ionty v jiskrovém kanálu přitahované elektromagnetickým polem to neumožňují. Elektrický proud nadále klesá a je před dosažením maxima, napětí klesá, viz Obr. 1.8. [1; 2]



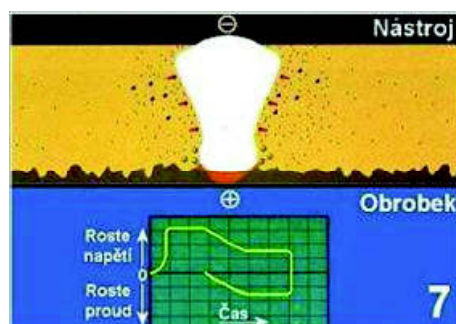
Obr. 1.8 Krok 5. [2]

Krok 6.: Napětí i elektrický proud se stabilizoval. Teplota a tlak uvnitř bubliny dosahuje maximum. Tavení a odpařování obou materiálů roste, viz Obr. 1.9. [1; 2]



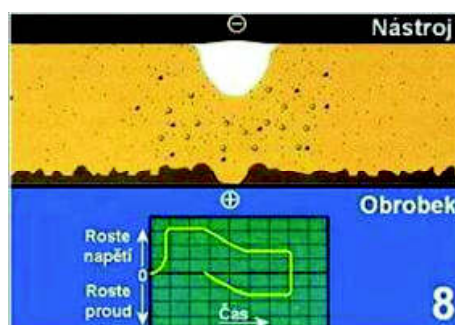
Obr. 1.9 Krok 6. [2]

Krok 7.: Bublina se rozpadá, napětí i proud prudce klesají na nulu. Okolí se ochlazuje, rozrušený materiál obrobku se rozptyluje do okolí a na jeho povrchu se vytváří kráter, viz Obr.1.10. [1; 2]



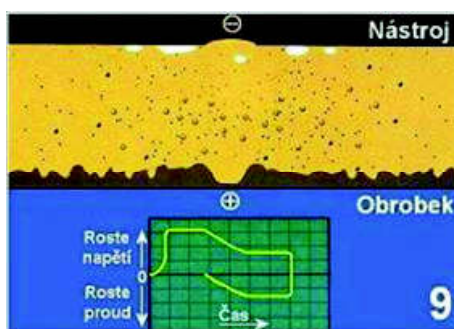
Obr. 1.10 Krok 7. [2]

Krok 8.: Bublina je na hranici zániku, do místa výboje proudí čerstvé dielektrikum, které ochlazuje povrch obrobku a tuhnou zbytky roztaveného materiálu, viz Obr. 1.11 [1; 2]



Obr. 1.11 Krok 8. [2]

Krok 9.: Cyklus je u konce. Částice po elektroerozivním výboji jsou rozptýleny v dielektriku, část se odplaví a bude přefiltrována, část bude tvořit jako základ pro další výboj, viz Obr. 1.12. [1; 2]



Obr. 1.12 Krok 9. [2]

1.2.3 Pracovní kapaliny

Pro EDM technologie se jako provozní kapaliny používají elektricky nevodivé dielektrikum. Nejčastěji se využívá derivátu ropy technický petrolej, transformátorový olej, směs petroleje a oleje, destilovaná a deionizovaná voda a vodní sklo.

Pracovní kapalina u EDM by měla především:

- chladit elektrody (pro větší účinek bývají zařízení vybaveny podchlazovací jednotkou dielektrika na 8 – 10 °C,
- odstraňovat zplodiny elektroerozivního jiskrového kanálu,
- mít dostatečnou viskozitu pro obnovení izolace po výboji,
- být chemicky neutrální,

- umožnit elektrický průraz na vhodnou konstantní vzdálenost elektrod, aby byl umožněn vznik výboje (velikosti $0,001 \div 0,1$ mm při výboji $U = 60$ až 300 V),
- mít vysokou teplotu hoření, aby nedošlo k úrazu a škodám,
- zaručovat stálost, nenáročnost na obměnu s ohledem na cenu,
- splňovat hygienické a ekologické požadavky. [1]

Přívod kapaliny do místa elektroeroze lze zajistit několika způsoby, a to:

- **vnější vyplachování** – nejčastěji používané, u větších hloubek se kombinuje s pulzním vyplachováním,
- **tlakové vnitřní vyplachování** – dielektrikum se přivádí díky otvoru v nástroji přímo do pracovního prostoru, má negativní vliv na tvarovou přesnost kvůli odvádění částic na bocích dutiny,
- **vyplachování odsáváním** – lze zaručit velmi dobrou tvarovou přesnost,
- **pulzující vyplachování** – pomocí oddalování elektrody (na $0,15$ až 10 s). Vypíná se pracovní proud a zapíná se až po nastavení optimální jiskrové mezery.
- **axiální vyplachování směrem k pohybu drátu** – využití při WEDM,
- **axiální vyplachování směrem k pohybu drátu v ponořeném stavu** - využití při WEDM. [1; 2]

1.2.4 Nástrojové elektrody

Na nástrojové elektrody u EDM technologie jsou kladeny specifické požadavky na:

- vysokou elektrickou vodivost,
- dostatečnou mechanickou pevnost,
- úzké tolerance rozměru,
- příznivou cenu vzhledem k použitému materiálu nástrojové elektrody

Přehled materiálů nástrojových elektrod viz Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Materiály nástrojových elektrod [2]

Materiál	Vlastnosti
Hliník	Nejčastější použití na předběžné, hrubé opracování otvorů bez velkých přechodů a osazení v obrobcech z oceli a SK
Grafit	Nejčastější používaný materiál vůbec. Je dobře obrobitelný a málo se opotřebovává. Nevýhodou je znečišťování stroje.
Měď	Dobrá elektrická vodivost, vysoká životnost. Měděné elektrody nedosahují takového výkonu jak ty z grafitu.
Měď - grafit	Často se používá pro obrábění tvrdých ocelí a karbidu wolframu, za cenu 1,5 až 2 krát dražší než grafit.
Mosaz	Příznivá cena elektrod s vyšším opotřebením než měď. Využívá se pro hloubení úzkých otvorů.
Wolfram	Pro výrobu děr $D \leq 0,2$ mm.
Měď – wolfram a stříbro – wolfram	Využívají se k speciálním účelům hloubení úzkých, hlubokých drážek. Vyrábějí se slinováním. Velmi vysoká pořizovací cena.

1.2.5 Výhody a nevýhody EDM

Mezi výhody patří:

- obrábět jakýkoliv vodivý materiál bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti (tvrdost, houževnatost, pevnost),
- výroba složitých tvarů, kterých nelze běžnými metodami obrábění dosáhnout,
- na obrobek není vyvíjeno krom upnutí žádné mechanické zatížení,
- odpadá starost s velkoobjemovým třískovým hospodářstvím – vzniká pouze kal na dně nádrže,
- jednoduchá výroba nástrojových elektrod – využívají se dobře obrobitelné materiály,
- nevznikají na hranách otřepty.

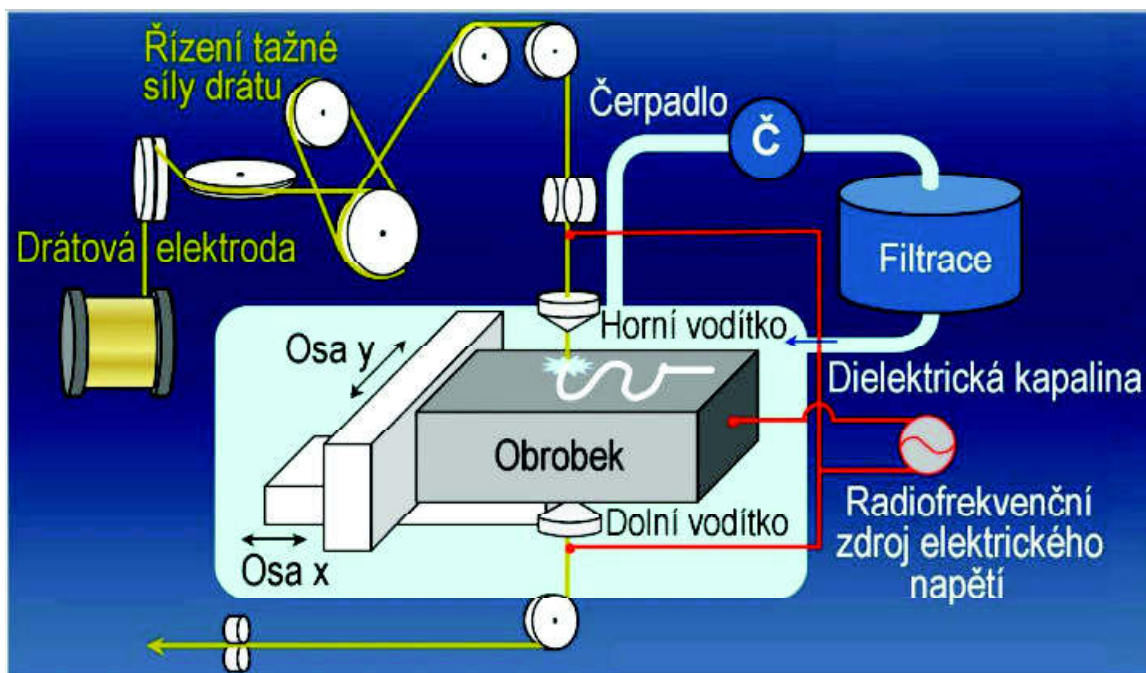
Mezi nevýhody patří:

- nízká produktivita vzhledem k jakosti obrobených ploch,
- nutnost obrábět pod hladinou provozní kapaliny,
- nejistá jakost obrobených ploch, která závisí na mnoha okolnostech,
- nízká produktivita při opracování lehce obrobitelných materiálů (např. hliníku).

1.3 Princip WEDM

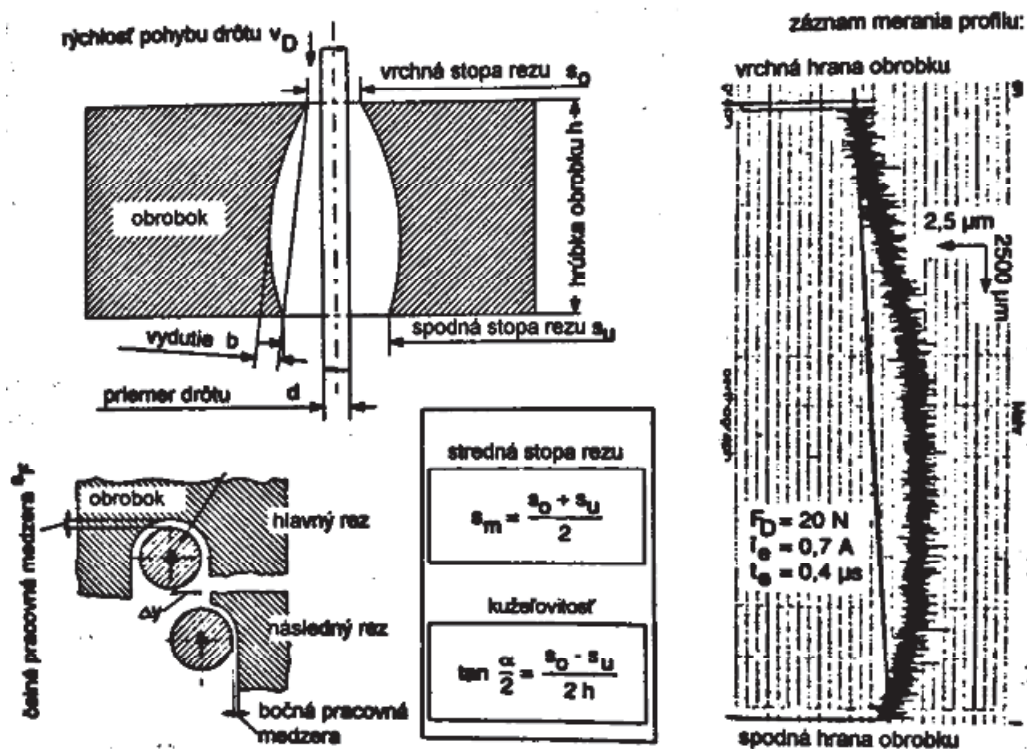
Technologie elektroerozivního drátového řezání, viz Obr. 1.13, patří do skupiny NMO se vyznačuje minimální šířkou řezu. To je dáno především díky použité nástrojové elektrodě, odvíjejícímu se drátu z cívky o průměru 0,02 až 0,35 mm. Drát se odvíjí ve vertikálním směru a jen v ojedinělých případech horizontálně. Pro WEDM je zapotřebí zajistit konstantní tahovou sílu a předpětí drátu. Drát se kvůli opotřebení použije jen jednou, jen u starších zařízení můžeme nalézt vícenásobného průchodu drátu pro vyjiskřování již prořezaných kontur.

Uplatnění nalezne především k výrobě střižných a lisovacích nástrojů, speciálně tvarovaných nástrojů, při dělení těžce obrobitelných materiálů třískovým obráběním, tzn. velmi tvrdé a pevné materiály (elektricky vodivé keramické materiály – SiC, Si₃N₄, slinutých karbidů, kalených ocelí, titanových slitin, atd.), které jsou velmi nákladné na opracování běžnými známými metodami. [1; 7; 19]



Obr. 1.13 Řezání drátovou elektrodou [9]

Elektrickými výboji mezi drátovou elektrodou a obrobkem se vytváří pracovní mezera, viz Obr. 1.14 Geometrie WEDM s barelovým efektem. Hlavní posuv zajišťuje pohyb stolu a v případě čtyřosého řezu v omezeném rozsahu také horní vodící hlava a to tak aby byla dodržena mezielektrodová vzdálenost. Jelikož nedochází k přímému kontaktu nástroje s obrobkem, nedochází k přenosu mechanického napětí z drátové elektrody na obrobek. Díky čemuž je při několikanásobných řezech docílena vysoká integrita povrchu. [1; 7]



Obr. 1.14 Geometrie WEDM [1]

Parametry WEDM:

Dosahovaná přesnost je v rozmezí $\pm 0,0025$ mm a drsnosti obrobených ploch $0,08 \mu\text{m}$ až $0,3 \mu\text{m}$ Ra po druhém řezu. Rovnoběžnost řezu do $2 \mu\text{m}$ na 200 mm tloušťky materiálu. Přesnost polohy drátu závisí na tepelné stabilitě: $\pm 1^\circ\text{C}$ je $\pm 1 \mu\text{m}$, $\pm 3^\circ\text{C}$ je $\pm 3 \mu\text{m}$. Plynule nastavitelný sklon drátu až 45° . V závislosti na použití konkrétního zařízení, výšce a druhu obráběného materiálu, atd. [2; 7; 20]

1.3.1 Drátové elektrody

Pro technologii WEDM představuje jako pracovní nástroj drát. Ten se vyrábí tažením za studena, na nichž se vytvářejí vrstvy, které zvyšují výkon řezání.

Dráty se vyrábějí v \varnothing 0,03 až 0,35 mm z mědi, nebo mosazi. Jemné řezy vyráběné dráty o \varnothing 0,03 až 0,07 se vzhledem k mechanické pevnosti využívají dráty z molybdenu či wolframu. Běžně používaná mosaz obsahuje 35 až 37% Zn. Využívá se také pozinkované dráty z mědi, nebo mosazi, jelikož řezací výkon drátu je přímo úměrný obsahu Zn. Povlaky často obsahují 45% Zn a nejnovější trend je až 65% Zn. Povlaky jsou více soudržné a zlepšuje se i výsledná kvalita obrobených ploch. Nynější vývoj se pak ubírá k povlakování ocelových drátů mědí pro jejich vysokou elektrickou vodivost, nebo grafitem za účelem zvýšení rychlosti odvíjení drátu. Na Obr. 1.15 Drátové elektrody - z mědi, mosazi a pozinkovaný drát. [1; 7]



Obr. 1.15 Drátové elektrody [10]

Dráty se vyrábějí v rozmezí pevností od 400 MPa do 1000 MPa. Pevnost drátu je odvislá od účelu použití – tvrdý drát je vhodný na velmi přesné řezy při vysokém předpětí a automatický systém navlékání drátu AWT, měkký drát pro úhlové řezy. Rozdělení drátů podle pevnosti na :

- měkké – $R_m < 450$ MPa
- polotvrdé – $R_m = 450 < 800$ MPa
- tvrdé – $R_m > 800$ MPa

1.3.2 Dielektrikum

Dielektrické medium se neliší od standartního EDM obrábění jak je uvedeno v kapitole 1.2.3. Pro WEDM se v praxi využívá dvou způsobů odvodu zplodin a erodovaných částic:

- a) proudem dielektrika z horní a spodní trysky
- b) ponořením obrobku do dielektrika v kombinaci s přívodem dielektrika proudem z trysek

2 STÁVAJÍCÍ STAV A MOŽNOSTI VYUŽITÍ TECHNOLOGIE ELEKTREROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ

Technologie WEDM se v dnešní době nevyvíjí jako taková, ale pouze se zdokonaluje stávající systém, ať už se jedná o servomotory nové generace, sofistikovaný systém pohonů stolu a automatického navíjení drátu AWT. Pokrok také nalezneme ve vývoji stále výkonnějších drátových elektrod a tím také související optimalizaci nákladů. [7]

2.1 Využití elektroerozivního drátového řezání v RMTVC

Společnost Regionální materiálově technologické výzkumné centrum (RMTVC) vysoké školy báňské technické univerzity Ostrava, je výzkumné centrum, jež je zaměřeno na vývoj, přípravu, zkoumání a optimalizování pokročilých materiálů a technologie jejich přípravy pro aplikaci v praxi.

Činnost Regionálního materiálově technologického výzkumného centra se orientuje na přípravu vysoce čistých materiálů, speciálních slitin, biomedicínských materiálů, vývoj materiálů pro vysokoteplotní aplikace a energetiku, přípravu materiálů progresivními technologiemi práškové metalurgie (magnetické materiály, frikční materiály, kompozitní materiály apod.), přípravu nanokrystalických materiálů na bázi neželezných kovů, jejich slitin a ocelí připravených extrémní plastickou deformací, výzkum pochodů v tekuté fázi probíhajících v reaktorech majících vliv na užité vlastnosti materiálů, fyzikální a matematické modelování procesů tváření materiálů včetně kování a aplikace získaných poznatků na výzkum a vývoj technologie tváření komponent pro zařízení jaderné energetiky. Souhrnnost řešení materiálově technologické oblasti je dále zdokonalena studiem degradačních procesů sledovaných materiálů působením koroze, vysokých teplot, napěťových stavů a zkřehnutí vlivem působení vodíku a jejich vlivu na mechanismus degradace a bezpečnost při provozním nasazení. [11]

2.2 WEDM v laboratoři – CHMER G32F

Pro účely zpracování nově vyvinutých materiálů či po úpravě specifických vlastností materiálů stávajících využívá výzkumný program 2 (VP2) s názvem: „*Vývoj a optimalizace procesů práškových technologií pro výrobu vybraných druhů materiálů a výrobků*“ elektroerozivní drátovou řezačku značky **CHMER G32F**, viz Obr. 2.1 a Tab. 2.1 s technickými parametry stroje.



Obr. 2.1 CHMER G32F

Celé zařízení se skládá z několika částí – samotného stroje, řídicí jednotky, jednotky automatické stabilizace přívodu elektrického proudu AVR, zásobníku vody s filtračním systémem, podchlazovací jednotky a zařízení na výrobu laboratorní vody.

Tab. 2.1 Parametry stroje [12]

Parametr	Jednotka	Velikost
X, Y osy	mm	360x250
U, V, Z osy	mm	60x60x220
Max. Velikost obrobku (Š x H x V)	mm	725x560x215
Max. hmotnost obrobku	kg	300
XY rychlost posuvu	mm · min ⁻¹	Max. 800
Motor systém	-	AC servomotor
Rozsah průměrů drátu	mm	Ø 0,15 ~ Ø 0,3
Max. rychlost odvinu drátu	mm · s ⁻¹	340
Napínání drátu	g	300 ~ 2400
Max. úhel kužele (°)	°	± 14,5 °
Vnější rozměr (Š x H x V)	mm	2200x2100x2100
Hmotnost (včetně napájení a chladicího systému)	kg	2300
Velikost nádrže chladicí kapaliny	l	300

Elektroerozivní drátová řezačka CHMER G32F je koncipována pro práci bez ponoru obrobku a přívod dielektrika je pomocí horní a spodní trysky, jež jsou součástí horního a dolního vodítka s diamantovým vedením viz příloha A a B.

Přívod elektrického proudu je zajištěn ve vodících hlavách párem karbidových napájecích kontaktů, viz příloha C (nový a z části použitý).

Potřebné množství pracovního média – dielektrika zajišťuje zařízení na úpravu vody z vodovodního řádu AQUA OSTOMIC O2, viz příloha D, která svým několika stupňovým systémem filtrace demineralizuje kohoutkovou vodu. Toto zařízení vyrobí za hodinu 8 litrů demineralizované vody při spotřebě přibližně 25 litrů vody z kohoutku. Celý proces demineralizace je: mechanická filtrace, uhlíkový filtr, demineralizace (reverzní osmóza) a dočištění iontoměníči (směs anexu a katexu). Stroj je pak vybaven dvěma válcovými filtry o rozměrech: D = 300mm d = 47mm v = 500mm s propustností částic 5μm, viz příloha E a deionizační jednotkou, která při nízké hodnotě kondukce začne deionizovat dielektrikum vháněním do nádoby s deionizační pryskyřicí, viz příloha F.

Obrobky lze na stroj upínat několika způsoby. Nejběžnější metoda je za pomoci standardizovaných upínek, nebo použití upínacího systému HIRSCHMANN 4000, viz příloha G. Případně lze použít proti pohybu před dořezáním supermagnetů, které díky své malé velikosti (\varnothing 20 mm x 8 mm) a extrémní síle, jsou magnety lehce aplikovatelné při řezacím procesu. Slouží k zajištění odřezávaných obrobků a zamezí uvolnění obrobku při odříznutí z úvazku. Nedojde k poškození spodní trysky, ke stopám po drátu a eliminuje přetržení drátu při dořezávání. Viz příloha H.

Stroj pracuje ve vlastním operačním systému W5F a dráhu řezání lze zadat buďto ručně přímo na stroji pomocí G a M kódů, viz příloha I a J, nebo nahráním NC kódu do stroje vytvořeného v CAM systému. Technologické vlastnosti se pak nastavují před samotným řezáním a ukládají se do databáze stroje, z níž se při řezu po vyvolání nastaví. Lze řezat všechny řezy stejnými parametry, nebo pro každý řez jinými, např. při vícenásobném řezu. Technologické parametry viz Tab. 2.2

Tab. 2.1 technologické parametry [15]

Parametr	Popis	Rozsah/Velikost/Specifikace
SC	Technologie	Lze vyvolat již uložené parametry
OV	Zapalovací napětí	0-15 / 70-145 V
PW	Typ generátoru	Volba mezi DC – AC generátorem
ON	Zapínací čas	1-10 / čas na dosažení špičky proudu a frekvence
OFF	Vypínací čas	3-52 / úprava proudu, rychlosti a frekvence
AN	Ochrana ON	1-10 / Nastavuje pomocný proud pro ON
AFF	Ochrana OFF	3-52 / Nastavuje pomocnou frekvenci pro OFF
SV	Napětí serva	5-120/ 10 -75 V / Zabraňuje zkratu drátu tím, že drží jiskrovou mezeru GAP mezi drátem a obrobkem
FR	Citlivost serva	0-50 / Doladuje nastavení SV
WF	Odvin drátu	0 – 15 / 0 – 340 mm · s ⁻¹
WT	Napnutí drátu	0 – 15 / 490 – 2400 g
WL	Výplach	0 – 7 / frekvence čerpadla 15 – 65 Hz
FM	Servo mod	0 = servo; 1 = v _f konstantní; 2 = Maximální posuv je vázán na nejvyšší servo rychlost a limity
F	Konstantní posuv	0 – 500 mm · min ⁻¹ v závislosti na FM lze nastavit ručně posuv
CW	Velikost korekce drátu	Velikost korekce dána \varnothing drátu a druhu řezaného materiálu

3 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

Pro potřeby mechanických zkoušek byly vyrobeny vzorky kruhovitého průřezu $\varnothing 22^{+0,1}_{-0,05}$ mm z pěnového hliníku s označením Alporas. Ty byly nejprve vyřezány z polotovaru tvaru cihly vysoké 100 mm, které pak byly rozřezány na délku 33 mm pro tlakové zkoušky. Pro porovnání řezů byl navržen řez téhož tvaru a délky 100 mm v celistvém hliníku.

3.1 Návrh experimentu - Použité materiály řezání

Pro experiment byly zvoleny 2 materiály. První zkoumaný z hliníkové pěny a druhý z celistvého hliníku.

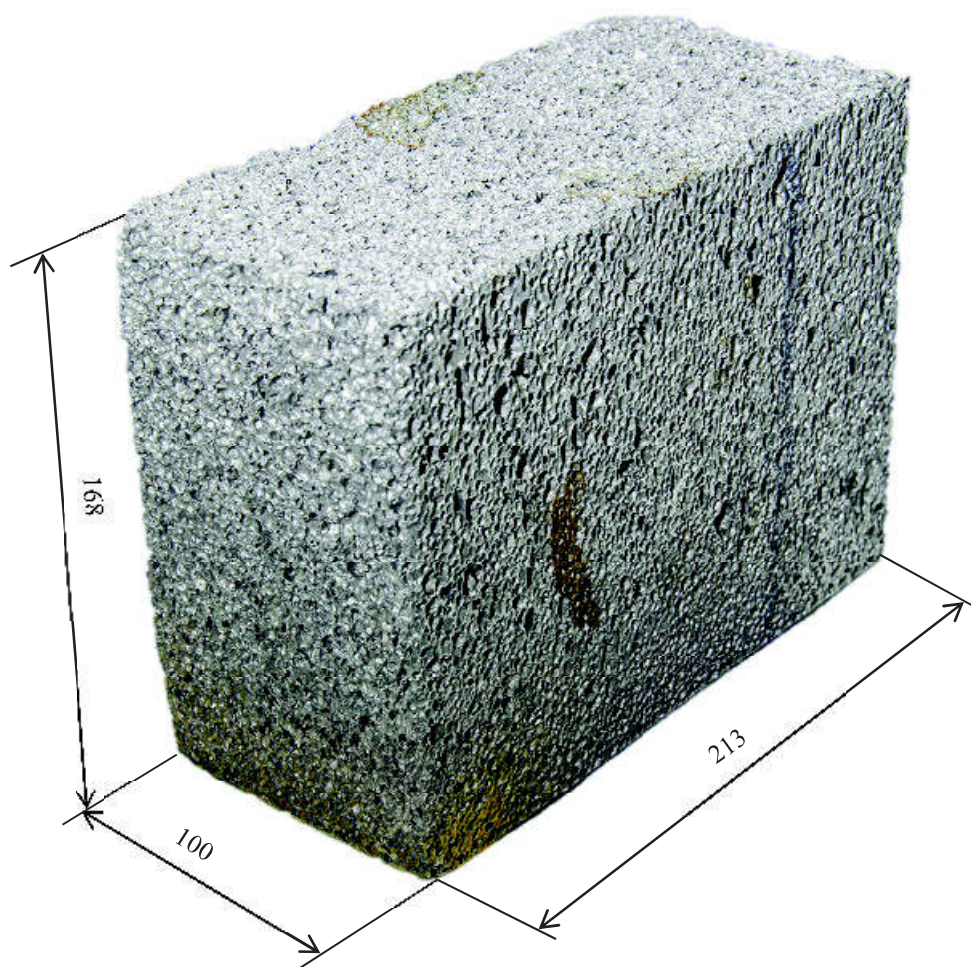
3.1.1 Hliníková pěna ALPORAS

Výchozím zkušebním materiálem pro zkoušky řezů byla Al pěna Alporas o rozměrech 168 x 100 x 213 mm, hmotností $m = 1174,8$ g a hustotou $\rho = 0,15$ až $0,25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (pouze 1/10 z hustoty čistého hliníku) v závislosti na velikosti pórů (v dolní části hustší struktura s rostoucí pórovitostí od základny nahoru), viz Obr. 3.1. Chemické složení před úpravou prášku na tuhou pěnu bylo 1,5 hm. % Ca +1,5 hm. % TiH_2 a 97% Al hm. %. Materiál byl vyroben metodou práškové metalurgie na Ústavu materiálův a mechaniky strojův SAV v Bratislavě. Pórovitá struktura vznikla po smíchání prášku a vylisování pomocí tepelného zpracování při kterém došlo k rozkladu TiH_2 na $\text{Ti} + \text{H}_2$ a vodík tak vytvořil jednotlivé póry. Přesné parametry a podmínky použité během procesu přípravy nejsou v práci uvedeny z důvodu "know how" tohoto procesu.

Materiál se vyznačuje:

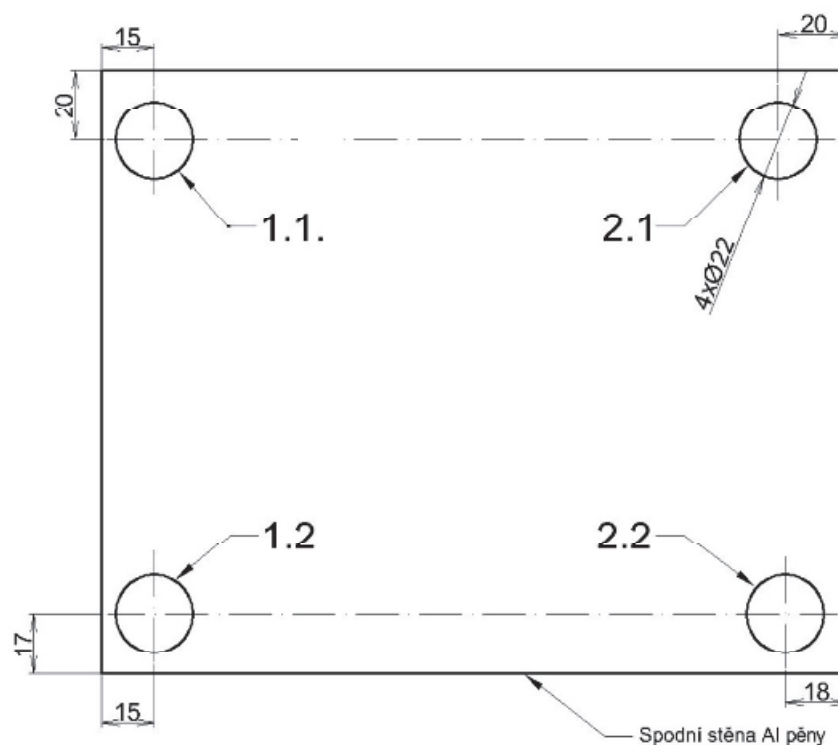
- Vysokou specifickou tuhostí
- Vynikající schopností absorpce mechanické energie
- Vynikající zvukovou izolací
- Nízkou tepelnou vodivostí (1/60 vodivosti celistvého Al)
- Trojdimenzální stabilitou mnohostěnných buněk

Použití v širokém spektru aplikací, např.: v konstrukci automobilů jako ochranný materiál proti nárazům. Ve stavebnictví, jako pohledová plocha a izolační vrstva. V strojírenství pro svou nízkou hmotnost a pohlcování vibrací, apod.



Obr. 3.1 Hliníková pěna

Nejprve bylo nutné rozhodnout, v kterých místech budou provedeny řezy, aby hodnoty výsledků tlakových zkoušek měly vypovídající hodnotu. A také se využilo co nejvíce objemu Al pěny. Pro další využití tak bylo určeno, že se vyřežou celkem 4 válečky v rozích a to tak, že se 2 budou nacházet v místech s nízkou pórovitostí v dolní části pěny a 2 v místech vyšší pórovitosti v horní části hliníkové pěny, viz Obr. 3.2 s označením vzorků.



Obr. 3.2 Rozvržení řezů válečků

3.1.2 Celistvý hliník

Na výběr celistvého hliníku bylo několik variant s různým chemickým složením. Materiály měly různou čistotu a doprovázelo je většinou několik prvků, které by ovlivnily průběh řezu v závislosti na rozpustnost těchto prvků v hliníku a teplotou tavení. Mezi uvažovanými materiály byly:

- EN AW 2007 – Al 92,6 hm %, Cu 4,2 hm %, Mg 0,84 hm % a další stopové prvky pod 1 hm %
- EN AW 2024 – Al 92,9 hm %, Cu 4,4 hm % a další stopové prvky pod 1 hm %
- Al Si 7Mg – Al 93,15 hm %, Si 6,3 hm % a další stopové prvky pod 1 hm %
- EN AW 5005 – Al 99 hm %, Mg 0,19 hm %, Si 0,17 hm %, Fe 0,28 hm %

První dva z uvedených materiálů sice neobsahují žádný z těžce tavitelných kovů - obsahují především Cu a Mg, které mají s Al rozpustnost a i teploty tavení a varu se od sebe neliší. Nevýhodou těchto materiálů ale je u převažujícího prvku Cu jeho tepelná vodivost, která je 1,6 krát větší než u Al, což by mohlo způsobit zkreslení naměřených rozměrů a technologických parametrů.

Další z materiálů Al Si 7Mg byl pro potřeby porovnání s Al pěnou vyloučen, protože hodnoty teploty tavení a varu křemíku v tomto materiálu převyšují výrazně hodnoty u hliníku (teplota tavení Si je 2 krát větší nežli Al a teplota varu je 1,3 krát větší nežli u Al). Další nevýhodou pak je úplná nerozpustnost křemíku v Al, viz příloha O.

Chemické složení všech uvedených materiálů bylo změřeno ručním spektrometrem Innov-X Systems Inc., typ Delta Premium, viz příloha M.

Materiál určený k porovnání řezů byl určen EN AW 5005 a to především díky svému vysokému obsahu Al, ale zároveň také obsahu některých přísad, jelikož ani Al pěna nebyla vyrobena z 100% Al. Polotovar byl uřezán na pásové pile z tyče Ø 63 mm na délku 105 mm a čela zarovnána pomocí horizontálního soustruhu na stejnou délku jako výška Al pěny, neboli na 100 mm, viz Obr. 3.3



Obr. 3.3 Polotovar celistvého hliníku

3.2 Realizace experimentu

Než bylo možné začít s vyřezáváním válečků, bylo nutné určit technologické parametry, při kterých se budou vyrábět. Proto pro tyto potřeby byl zvolen zkušební řez, kde se určilo jakým způsobem upnout součást do stroje, a vyzkoušely se řezné parametry stroje, jelikož pro tento druh materiálu nebylo uvedeno doporučené nastavení od výrobce stroje. Řez byl proveden na šířce obrobku 100 mm a velikosti 10 x 14 mm. Z dřívějších zkušeností s WEDM byl proveden nástin technologických parametrů, které byly několikrát z důvodu trhání drátu upravovány do specifikace uvedené v Tab. 3.1. Důraz byl kladen na hlavní technologické atributy vzhledem k výšce řezu na: na napnutí drátu WT, odvinu drátu WF, velikosti napětí serva SV a výplachu. Výsledný odřez Al pěny je znázorněn na Obr. 3.4.

Tab. 3.1 Technologické parametry stroje na testovacím řezu Al pěny

Parametr	Velikost
SC	1
OV	5=95V
PW	A00
ON	2
OFF	25
AN	1
AFF	40
SV	55
FR	15
WF	10 (390 mm·s ⁻¹)
WT	8 (1000 g)
WL	6
FM	0
F	0,0
OFT.	0,190

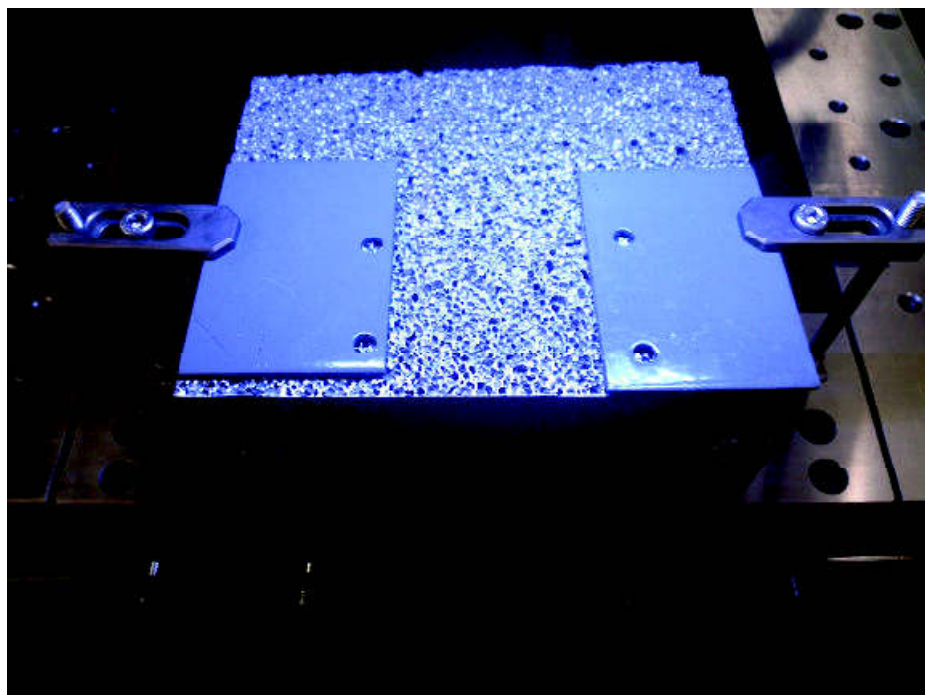


Obr. 3.4 Zkušební odřez Al pěny

Pro všechny řezy, jak v Al pěně, tak v celistvém hliníku byla jako řezná elektroda použit drát \varnothing 0,25 mm a pevnosti v tahu 1000 MPa – PENTA cut G 0,25 P5 1000 N·mm⁻².

3.2.1 Řezy Al pěny

Prvním krokem před vlastním řezáním, bylo ustavení a upnutí součásti pomocí dvou standardizovaných upínek, čtyř šroubů s vnitřním šestihranem M8 x 110 – 8.8 DIN 912, dvěma podložkami pod opěrnými šrouby z hliníku proti poškození stolu a dvěma plechy na rozložení upínací síly upínek, viz Obr. 3.5.



Obr. 3.5 Upnutí Al pěny

Oproti zkušebnímu zářezu bylo pozměněno nepatrně několik parametrů a to: odvinutí drátu WF snížen na hodnotu 9 ($340 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), napnutí drátu WT zvýšeno na hodnotu 10 (1390 g) a výplach stanoven na průtok 7 (z horní trysky $2,4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, z dolní $1,7 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Při řezání válečků byly zaznamenány hodnoty:

- Rychlost posuvu na několika místech
- Stabilita jiskrové mezery GAP
- Spotřeba drátu
- Čas řezání

3.2.1.1 Řez válečku 1.1

Hodnoty parametrů řezů jsou znázorněny v tabulce 3.2, použitý NC kód v Tab. 3.3 a výsledný váleček v na Obr. 3.6.

Tab. 3.2 Hodnoty řezu válečku 1.1

Parametr	Velikost
Průměrná rychlost posuvu v_f	$3,45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Stabilita jiskrové mezery GAP	$58,7^{+2,3}_{-2,4} \text{ V}$
Spotřeba drátu L_d	464 m
Čas řezání t	22,4 min
Délka řezu s	79,65 mm

Tab. 3.3 NC kód válečku 1.1

Řádek	Kód
10	G92X0.Y0.
20	S1
30	G0X24.Y0.5
40	G41
50	G1Y-9.5
60	G02X0.Y0.J-11.
70	M02



Obr. 3.6 Váleček 1.1

3.2.1.2 Řez válečku 2.1

Hodnoty parametrů řezů jsou znázorněny v tabulce 3.4, použitý NC kód v Tab. 3.5 a výsledný váleček v na Obr. 3.7.

Tab. 3.4 Hodnoty řezu válečku 2.1

Parametr	Velikost
Průměrná rychlost posuvu v_f	3,35 mm · min ⁻¹
Stabilita jiskrové mezery GAP	58,4 ^{+3,5} _{-2,4} V
Spotřeba drátu L_d	460 m
Čas řezání t	22 min
Délka řezu s	79,65 mm

Tab. 3.5 NC kód válečku 2.1

Řádek	Kód
10	G92X0.Y0.
20	S1
30	G0X-14.Y0.5
40	G41
50	G1Y-9.5
60	G02X0.Y0.J-11.
70	M02



Obr. 3.7 Váleček 2.1

3.2.1.3 Řez válečku 2.2

Hodnoty parametrů řezů jsou znázorněny v tabulce 3.6, použitý NC kód v Tab. 3.7 a výsledný váleček v na Obr. 3.8.

Tab. 3.6 Hodnoty řezu válečku 2.2

Parametr	Velikost
Průměrná rychlost posuvu v_f	2,60 mm · min ⁻¹
Stabilita jiskrové mezery GAP	58,9 ^{+1,6} _{-2,5} V
Spotřeba drátu L_d	566 m
Čas řezání t	27,88 min
Délka řezu s	77,64 mm

Tab. 3.7 NC kód válečku 2.2

Řádek	Kód
10	G92X0.Y0.
20	S1
30	G0X-0.5Y-17.
40	G41
50	G1X7.5
60	G02X0.Y0.J-11.
70	M02



Obr. 3.8 Váleček 2.2

3.2.1.4 Řez válečku 1.2

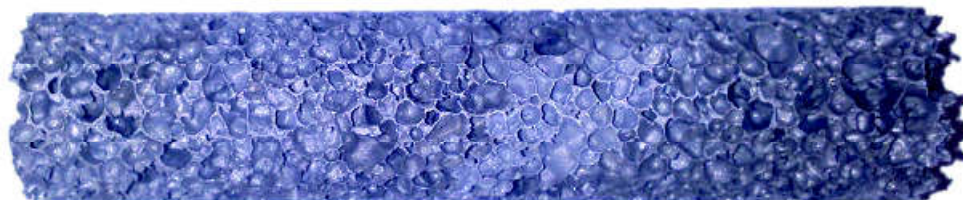
Hodnoty parametrů řezů jsou znázorněny v tabulce 3.8, použitý NC kód v Tab. 3.9 a výsledný váleček v na Obr. 3.9.

Tab. 3.8 Hodnoty řezu válečku 1.2

Parametr	Velikost
Průměrná rychlost posuvu v_f	2,81 mm · min ⁻¹
Stabilita jiskrové mezery GAP	59,4 ^{+2,1} _{-2,1} V
Spotřeba drátu L_d	561 m
Čas řezání t	27,53 min
Délka řezu s	77,65 mm

Tab. 3.9 NC kód válečku 1.2

Řádek	Kód
10	G92X0.Y0.
20	S1
30	G0X0.5Y-17.
40	G41
50	G1X-7.5
60	G02X0.Y0.J-11.
70	M02



Obr. 3.9 Váleček 1.2

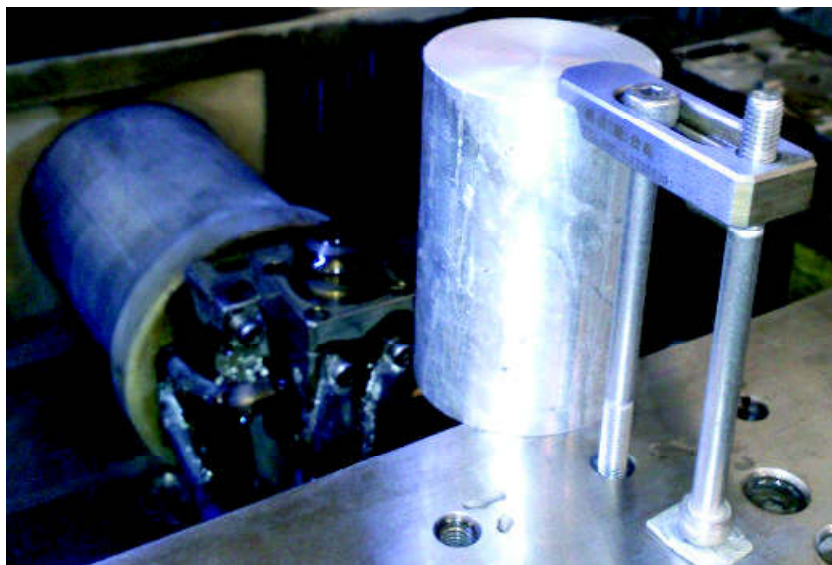
Jednotlivé naměřené hodnoty rychlosti posuvů v_f a velikosti stability jiskrové mezery GAP pro Al pěnu jsou uvedeny v příloze K a L.

Z řezu válečku bylo patrné z vizuálního pozorování display stroje a zvukových efektů vydávaných z řezů, že v místech s řidšími póry rychlost klesá (bylo v tomto okamžiku odřezáváno více materiálu, než na protilehlé straně válečku), a v této části také rostla stabilita jiskrových výbojů GAP. Proto byla pomocí počítačové tomografie (CT) vyhodnocena pórovitost Al pěny.

3.2.2 Řez celistvého hliníku

Součást byla před vlastním řezáním válečku v místě zářezu upravena dílenským pilníkem plochým ČSN 229 121, 250/3PSO na odstranění nečistot a oxidů z povrchu, které by výrazným způsobem stěžovaly zařezání drátové elektrody.

Upnutí součásti bylo realizováno přímo na stůl WEDM, kde bylo zapotřebí určit minimální velikost vysunutí, která je 45 mm. To je určeno součtem všech rozměrů mající vliv na upnutí a to: průměr obrobku ($\varnothing 22$ mm), minimální vzdálenost drátu od stolu (10 mm) a zářez do obrobku (3 mm). Po té pomocí dvou šroubů s vnitřním šestihranem M8 x 110 – 8.8 DIN 912, zalomenou upínkou se závitem 70 x 23 mm M8 a podložkou pod opěrným šroubem proti poškození stolu, viz Obr. 3.10

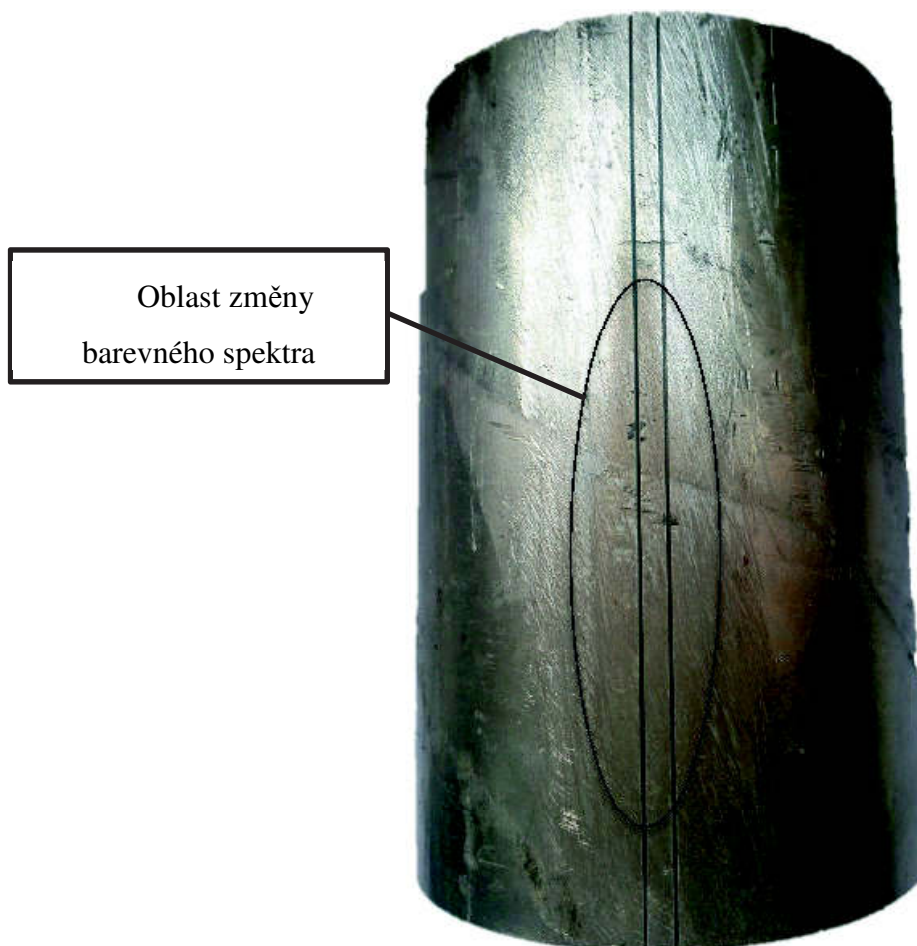


Obr. 3.10 Upnutí válce hliníku

Jelikož bylo zřejmé, že nebude možné použít stejných řezných parametrů, které byly použity u řezu Al pěny, byl proto proveden zkušební zářez 2 mm, na kterém byly parametry nastaveny. Použité parametry řezu jsou znázorněny v Tab. 3.10. Základní nastavení technologie se moc nelišilo. Změna byla především v nastavení napnutí drátu na nižší hodnotu, aby nedocházelo vzhledem k výšce řezu k trhání drátu v důsledku předpětí a ztenčením drátu výboji k přetržení. Další změnou a zároveň i problémem bylo nedostatečné chlazení a přívod dielektrika do místa řezu, jelikož stroj pracuje s přívodem dielektrika proudem z horní a dolní trysky (oproti jiným strojům pracujícím kombinací přívodu dielektrika tryskami a úplným ponořením obrobku v dielektriku). I když bylo nastaveno maximální možný průtok trysek (horní tryska $5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ a spodní $3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$), bylo patrné, že v prostřední části docházelo k tzv. řezu na sucho (bez dielektrika), což vedlo k výraznému prodloužení času řezu i v takto jinak dobře obrobitelném materiálu. To lze pozorovat na polotovaru válce v místě zářezu změnou barevného spektra vlivem tepla, které vzniklo během řezání, viz Obr. 3.11 Polotovar po řezu.

Tab. 3.10 Technologické parametry stroje při řezu celistvého hliníku

Parametr	Velikost
SC	1
OV	4=90V
PW	A00
ON	3
OFF	30
AN	2
AFF	45
SV	65
FR	9
WF	6 ($170 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
WT	6 (730 g)
WL	7
FM	0
F	0,0
OFT.	0,190



Obr. 3.11 Polotovár po řezu

Hodnoty parametrů řezů jsou znázorněny v tabulce 3.11, použitý NC kód v Tab. 3.12 a výsledný váleček v na Obr. 3.12.

Tab. 3.11 Hodnoty řezu celistvého válečku

Parametr	Velikost
Průměrná rychlost posuvu v_f	$0,22 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Stabilita jiskrové mezery GAP	$61,5^{+0,5}_{-0,6} \text{ V}$
Spotřeba drátu L_d	3395 m
Čas řezání t	338 min
Délka řezu s	74,1 mm

Jednotlivé naměřené hodnoty rychlosti posuvů v_f a velikosti stability jiskrové mezery GAP pro celistvý hliník jsou uvedeny v příloze Q a R.

Tab. 3.12 NC kód celistvého válečku

Řádek	Kód
10	G92X0.Y0.
20	S1
30	G41
40	G01Y-3.5
50	G40
60	G42G1X-0.2
70	G40
80	G41G1X0.2
90	G02X0.Y0.J-11.
100	M02

Na řádcích NC kódu 50 - 90 byla vložena část NC programu malého zářezu proti směru řezu válečku, díky které nevznikl v důsledku použití korekce před zářezem nechtěný zub o velikosti dvojnásobku korekce.



Obr. 3.12 Váleček celistvého Al

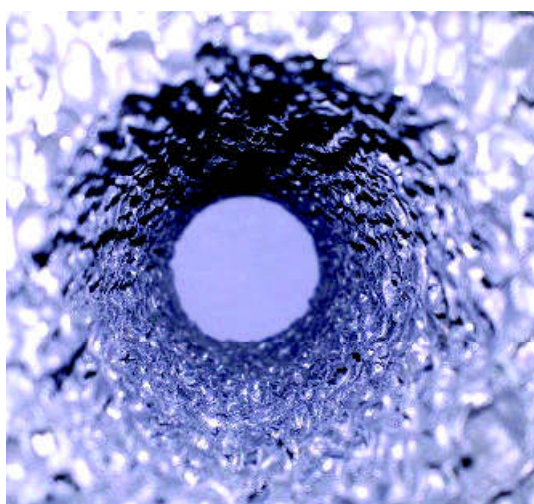
3.2.3 Zkouška řezu Al pěny vodním paprskem

Aby bylo z ekonomického, ale i praktického hlediska možnost porovnat náročnost a nákladnost řezů WEDM, byly proto provedeny dva řezy pomocí vodního paprsku **H Y PTV WJ2020-2Z-1xPJ – 2D**. První byl proveden metodou multipass - několikanásobný průchod po téže kruhové trajektorii, druhý metodou standard - klasické

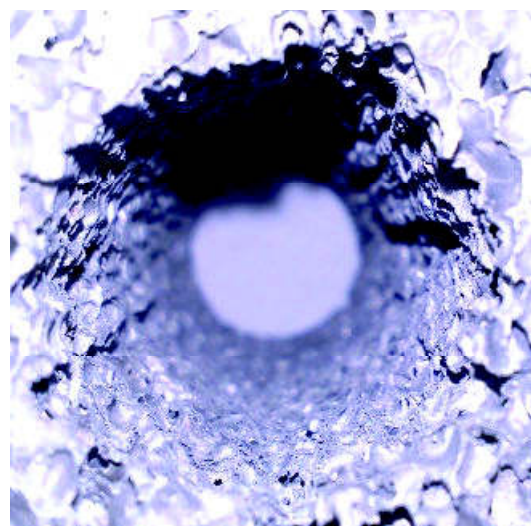
řezání po kruhové trajektorii pomalou rychlostí. Rychlosti byly stanoveny tak, aby byl vzorek celý prořezán - tedy na základě našich zkušeností. Ukázalo se však, že vzhledem k nulovým zkušenostem s řezáním kovové pěny, by mohly být rychlosti podstatně vyšší a tím by se také snížila cena za řez. Parametry vodního paprsku jsou znázorněny v Tab. 3.13 a výsledné otvory vyobrazeny na obrázku 3.13 a 3.14. U obou řezů bylo použito abraziva granát Austrálie zrnitosti MESH 80.

Tab. 3.13 Parametry vodního paprsku při řezání hliníkové pěny

číslo otvoru	barevné označení řezu	průměr vodní trysky	průměr zaostřovací trubice	tlak vody	hmotnostní průtok abraziva	způsob řezání otvoru	rychlost řezání	čas řezání
	-	[mm]	[mm]	[MPa]	[g·min ⁻¹]	-	[mm·min ⁻¹]	[min]
1	žlutá	0,33	0,9	350	100	multipass	1000	0,63
2	černá	0,33	0,9	350	400	standard	30	4,77



Obr. 3.13 Otvor po WJM multipass



Obr. 3.14 Otvor po WJM standard

Z obou řezů bylo patrné, že na vstupu bylo dosaženo dostačující kruhovitosti. Jak ale obrázky a následně i hodnoty rozměrů ukazují, tak u metody multipass došlo k výraznému zvětšení otvoru na výstupu paprsku z Al pěny a ten už nemá tvar válce, ale kužele. U metody standard nebyl rozdíl v průměru na vstupu a výstupu, ale byla nízká kvalita kruhovitosti. Ukázalo se však, že vzhledem k nulovým zkušenostem s řezáním kovové pěny, by mohly být rychlosti podstatně vyšší a tím by se také snížila cena za řez.

Z důvodu malého průměru válečků, nebylo možno vzorky vyjmout. Ty se tak propadly do vany stroje, odkud je nebylo možné dostat a provést porovnání s WEDM.

3.3 Měření součástí

Zkoumaná Al pěna i celistvý hliník byly po opracování změřeny a snímány. Z výsledných dat pak byly vytvořeny tabulky a grafy.

Každé měření je zatížené chybou. Ať už chybou měření (chyba absolutní) či chybou relativní. Chyby mohou vznikat v závislosti na měřidle, měřící metodě, okolních podmínkách (zejména teplotě), za kterých měření proběhlo, nebo osobě, která měření provedla. Chyby lze členit dle závislosti na časové závislosti (statické, dynamické), podle možnosti vyloučení (odstranitelné, neodstranitelné) a podle výskytu (hrubé, systematické, náhodné). Nejistota měření určuje rozsah hodnot kolem výsledku měření. Standardní nejistota u , která je vyjádřena směrodatnou odchylkou $s(\bar{x})$ zaručuje výsledek s pravděpodobností 68,27%. Rozlišují se dva základní typy nejistoty – nejistota typu A (u_A), která je dána směrodatnou odchylkou a standardní nejistota typu B (u_B) pomocí parciálních derivací funkční závislosti zdrojů nejistoty. [21]

3.3.1 Rozměry měření průměrů válečků / otvorů

3.3.1.1 Měření průměrů válečků Al pěny po WEDM

Jednotlivé průměry konkrétních válečků byly s ohledem na pórovitost a náchylnost hranic jednotlivých pórů měřeny třmenovým mikrometrem s talířkovými doteky Meßschraube s měřícím rozsahem 0 - 25 mm ČSN 25 1472, velikost 1 dílku 0,01 mm. Ten byl uložen v stojánku na mikrometry KINEX.

Podmínky při měření:

- Teplota při měření - 22 °C,
- Osvětlení – umělé, zářivkové proti stroboskopické
- Čas měření – odpoledne mezi 14 a 15h

Měření probíhalo tak, že byl každý váleček rozdělen na 6 oblastí, v kterých se provedlo v každé z nich čtyřikrát měření. Oblast označená v tabulce hodnot jako místo měření bylo sestupně od vstupu drátu do Al pěny po výstup drátu z pěny ve spodní části.

Při měření bylo nutné dávat pozor na umístění dotyků talířků mikrometru, aby nedošlo k hrubé chybě měření způsobené měřením v kráteru póru a dotahování řehtačky mikrometru, aby neopatrným zacházením nedošlo k destrukci tenkých hranic mezi póry. Výsledky z měření jsou v Tab. 3.14

Tab. 3.14 Naměřené hodnoty průměrů válečků Al pěny

		Vzorek			
		Velké póry		Malé póry	
č. měření	Místo měření [mm]	1.1 [mm]	2.1 [mm]	1.2 [mm]	2.2 [mm]
1.	0	22,01	22,01	22,02	22,02
2.	0	22,01	22,02	22,02	22,02
3.	0	22,01	22,02	22,01	22,01
4.	0	22,01	22,01	22,01	22,02
5.	20	22,01	22,01	22,01	22,01
6.	20	22,00	22,00	22,00	22,01
7.	20	22,01	22,01	22,00	22,01
8.	20	22,01	22,01	22,01	22,01
9.	40	21,99	22,00	21,99	22,00
10.	40	21,99	22,00	21,99	22,00
11.	40	21,99	21,99	22,00	21,99
12.	40	21,99	22,00	21,99	22,00
13.	60	22,00	22,00	22,01	22,01
14.	60	22,00	22,01	22,01	22,02
15.	60	21,99	22,00	22,00	22,01
16.	60	21,99	22,00	22,00	22,01
17.	80	22,01	22,01	22,01	22,02
18.	80	22,00	22,00	22,01	22,01
19.	80	22,01	22,01	22,01	22,01
20.	80	22,01	22,01	22,01	22,01
21.	100	22,02	22,02	22,01	22,02
22.	100	22,01	22,02	22,02	22,02
23.	100	22,02	22,01	22,02	22,02
24.	100	22,02	22,02	22,02	22,02

Z tabulky vyplývá nejmenší naměřený rozměr průměru válečku $D_{\text{Pmin}} = 21,99$ mm a největší naměřený rozměr průměru válečku $D_{\text{Pmax}} = 22,02$ mm.

3.3.1.2 Měření průměrů otvorů v Al pění po WEDM a WJM

Měření otvorů v Al pění bylo provedeno pomocí posuvného měřítka s nonickou diferencí 0,02 mm dle ČSN 25 1238 pouze na vstupu a výstupu drátové elektrody

a abrazivního vodního paprsku. To z důvodu nemožnosti použití jiné dostupné měřicí metody. Pomocí třídotekového dutinoměru, který vyvíjel příliš velký tlak na stěny při dotahování řehtačkou, pomocí průmyslové mikro rentgenové tomografie z důvodu velikosti cihly Al pěny, by byla dosažena přesnost pouze 0,14 mm.

Pro obě technologie, bylo provedeno na každé straně vždy 10 měření. V tabulce 3.15 jsou zaznamenány měření pro metodu WEDM a v tabulce 3.16 pro WJM. Hodnoty jsou uvedeny s přesností na 0,1 mm z důvodu měření přes póry kvůli své tenké stěně a s dotyky měřidla by mohlo docházet k chybám měření, které by přesnost na 0,02 mm nebylo možné zaručit.

Tab. 3.15 Naměřené hodnoty průměrů otvorů Al pěny po WEDM

Otvory po WEDM [mm]				
	1.1 - velké póry		1.2 - malé póry	
	Na hoře	Dole	Na hoře	Dole
1.	22,7	22,7	22,4	22,6
2.	22,8	22,7	22,5	22,8
3.	22,6	22,6	22,6	22,7
4.	22,6	22,7	22,4	22,6
5.	22,8	22,8	22,5	22,5
6.	22,6	22,8	22,4	22,6
7.	22,5	22,6	22,6	22,7
8.	22,6	22,7	22,6	22,5
9.	22,6	22,8	22,5	22,6
10.	22,7	22,7	22,5	22,5

Tab. 3.16 Naměřené hodnoty průměrů otvorů Al pěny po WJM

Otvory po WJM [mm]				
	multipass		standard	
	Na hoře	Dole	Na hoře	Dole
1.	22,2	22,8	22,6	28,4
2.	22,3	22,6	22,9	26,9
3.	21,9	23,5	22,8	28,7
4.	22,1	23,0	22,1	28,2
5.	22,2	22,3	22,5	27,0
6.	22,1	22,5	22,4	27,5
7.	22,3	23,0	22,7	28,2
8.	22,0	23,3	22,8	27,4
9.	22,3	23,1	22,6	27,2
10.	22,1	22,6	22,3	28,0

3.3.1.3 Měření průměru válečku celistvého Al

Měření válečku probíhalo stejným měřidlem a za stejných podmínek jako u válečků Al pěny, viz kapitola 3.3.1.1. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.17.

Tab. 3.17 Naměřené hodnoty průměrů válečku celistvého Al

EN AW 5005 - váleček		
č. měření	Výška měření [mm]	Průměr válečku [mm]
1.	0	21,97
2.	0	21,98
3.	0	21,98
4.	0	21,99
5.	20	21,93
6.	20	21,93
7.	20	21,95
8.	20	21,96
9.	40	21,91
10.	40	21,92
11.	40	21,92
12.	40	21,93
13.	60	21,91
14.	60	21,91
15.	60	21,94
16.	60	21,94
17.	80	21,92
18.	80	21,93
19.	80	21,95
20.	80	21,95
21.	100	21,94
22.	100	21,96
23.	100	21,98
24.	100	21,98

Z Tab. 3.17 lze pak určit nejmenší naměřený rozměr průměru válečku $D_{Cmin} = 21,91$ mm a největší naměřený rozměr průměru válečku $D_{Cmax} = 21,99$ mm.

3.3.1.4 Měření průměrů otvoru celistvého Al

Měření probíhalo za stejných podmínek jako měření válečku, akorát s rozdílným měřidlem. Zde byl použit třídotkový dutinoměr Mitutoyo ČSN 25 1446 s rozsahem 20 – 25 mm a velikostí jednoho dílku 0,005 mm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.18.

Tab. 3.18 Naměřené hodnoty průměrů otvoru celistvého Al

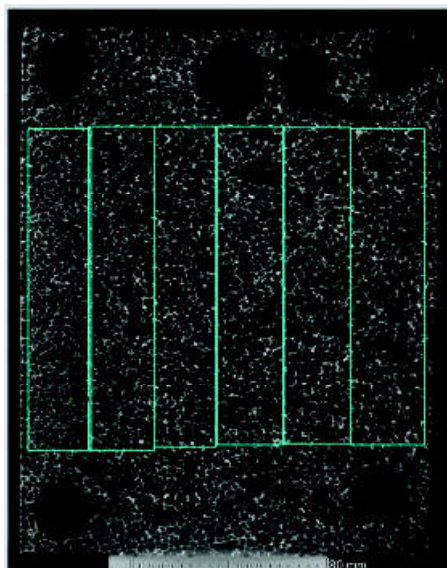
EN AW 5005 - otvor		
č. měření	Výška měření [mm]	Průměr otvoru [mm]
1.	0	22,765
2.	0	22,740
3.	0	22,760
4.	0	22,775
5.	20	22,820
6.	20	22,810
7.	20	22,825
8.	20	22,805
9.	40	22,825
10.	40	22,815
11.	40	22,825
12.	40	22,830
13.	60	22,825
14.	60	22,810
15.	60	22,820
16.	60	22,815
17.	80	22,805
18.	80	22,810
19.	80	22,815
20.	80	22,815
21.	100	22,780
22.	100	22,770
23.	100	22,780
24.	100	22,780

3.3.2 Měření pórovitosti Al pěny

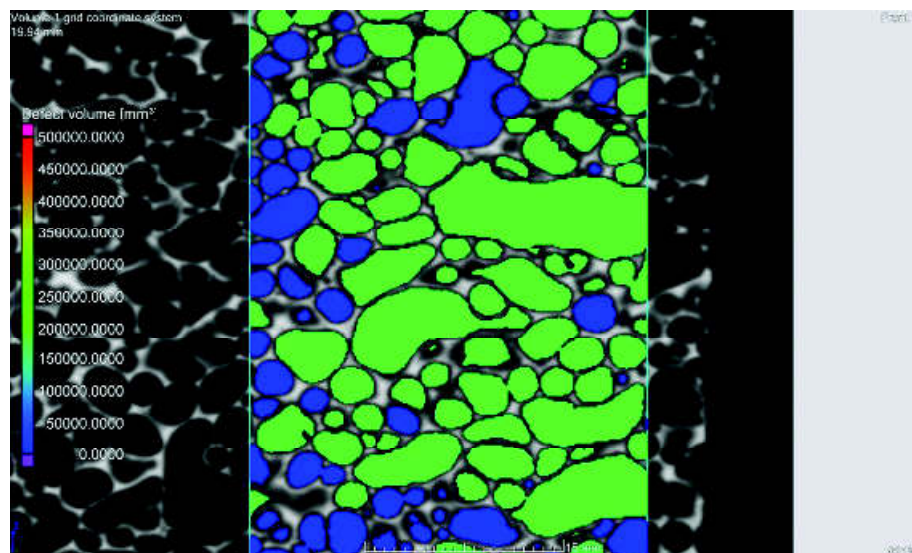
Porovnání proběhlo na přístroji *XT H 225* průmyslové mikro rentgenové (RTG) počítačové tomografii, viz příloha N.

Průmyslová mikro RTG počítačová tomografie využívá rozdíly RTG vlastností během interakce s hmotností jednoho studovaného materiálu. V případě rentgenového CT, to je obzvláště schopnost rentgenového záření proniknout různé druhy materiálů v různých hladinách jejich útlumu ve vztahu k vlastnostem analyzovaných objektů, zejména hustotou. Proto je nutné získat sérii 2D rentgenových snímků pro každý pevný úhel natočení během procesu skenování analyzovaného objektu s otáčením 360 °C po dobu následné rekonstrukce objemu CT skládající se z jednotlivých voxelů (rozlišení prostorového bodu). RTG snímek je 2D mapa pixelů, který ukazuje intenzitu útlumu paprsků signálů rentgenu procházející studovaným objektem. Různé úrovně šedi (šedá úroveň váhy jsou určeny podle typu detektoru a jeho měřítka, které odpovídají na různé intenzity útlumu). Na základě dostatečných počtu výstupků, je objem objektu CT rekonstruován pomocí algoritmu výpočtů. [17]

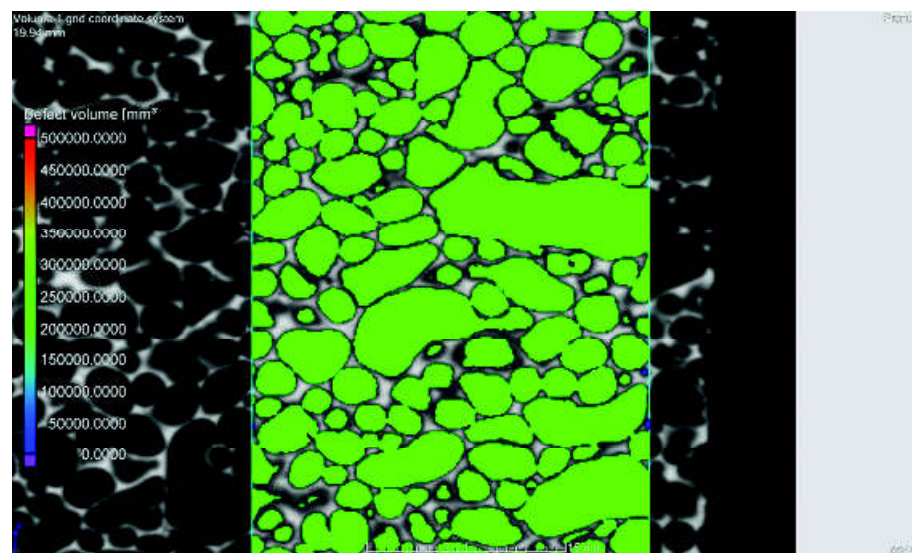
Porovnání pórovitosti proběhlo, tak, že se cihla rozdělila na 6 oblastí (regionů), v kterých se provedlo měření, viz Obr. 3.15 a v jednotlivých oblastech se určila pórovitost. Ta byla měřena ve dvou prahových hladinách mezi šedou a černou tzv. trsehold – 64 a 70, viz Obr 3.16 a 3.17 v regionu 6 a Tab. 3.19 znázorňující objemu pórů v procentech. Následně byl změřen objem v jednotlivých regionech při rozlišení voxel 0,14 mm, napětí 147 kV, proudu 137 μ A a času zaznamenávání recording time 15 min, viz Tab. 3.20 s hodnotami objemů v jednotlivých regionech.



Obr. 3.15 Rozdělení Al pěny na oblasti



Obr. 3.16 Pórovitost v regionu 6 threshold 64



Obr. 3.17 Pórovitost v regionu 6 při threshold 70

Tab. 3.19 Hodnoty objemu pórů podle thresholdu

region	objem pórů v % (threshold 70)	objem pórů v % (threshold 64)	vzdálenost [mm]
1	62,78	57,00	15,75
2	66,12	60,24	41,955
3	66,31	60,65	67,88
4	66,72	61,20	94,015
5	67,83	62,21	121,56
6	69,65	63,76	150,445

Tab. 3.20 Objem pórů v průřezu jednotlivých regionů

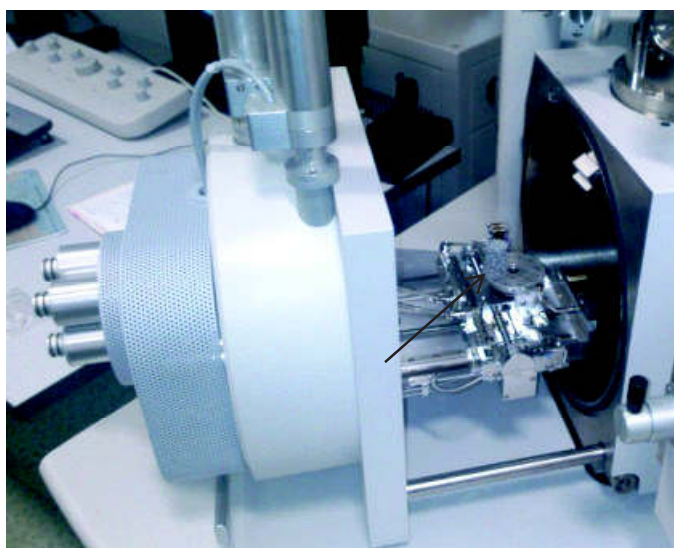
region	Objem [mm ³]
1	304 566
2	327 482
3	300 722
4	323 964
5	327 859
6	353 390

3.3.3 Snímání povrchu elektronovým mikroskopem

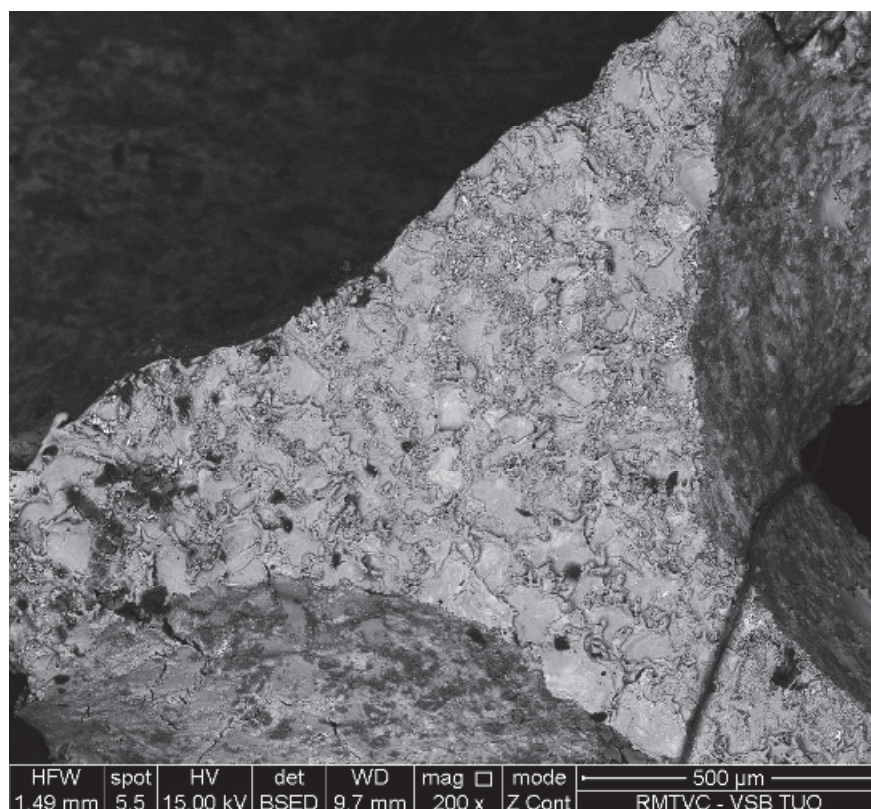
Po rozřezání válečků na dílčí části pro tlakové zkoušky, byl jeden z válečků snímán z horní strany rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM) **QUANTA FEG 450** v laboratoři útvaru 606 RMTVC, viz příloha P. Princip zařízení spočívá v zaměření úzkého paprsku elektronů na určitou oblast. Interakcí dopadajících elektronů s povrchem materiálu vzorku vznikají různé detekované složky. Jak paprsek snímá různé části na vzorku, dochází ke změně úrovně a charakteru signálu v detektoru. Z těchto zaznamenaných signálů je pak vytvářen obraz přenášený na obrazovku počítače.

Byly vyhotoveny snímky také celistvého Al a u hliníkové pěny změřeno chemické složení. Al pěna byla snímána jak metodou zpětně odražených elektronů BSED, tak především metodou sekundárních elektronů SE. Měření proběhlo na čele válečku Ø 22mm x 33mm

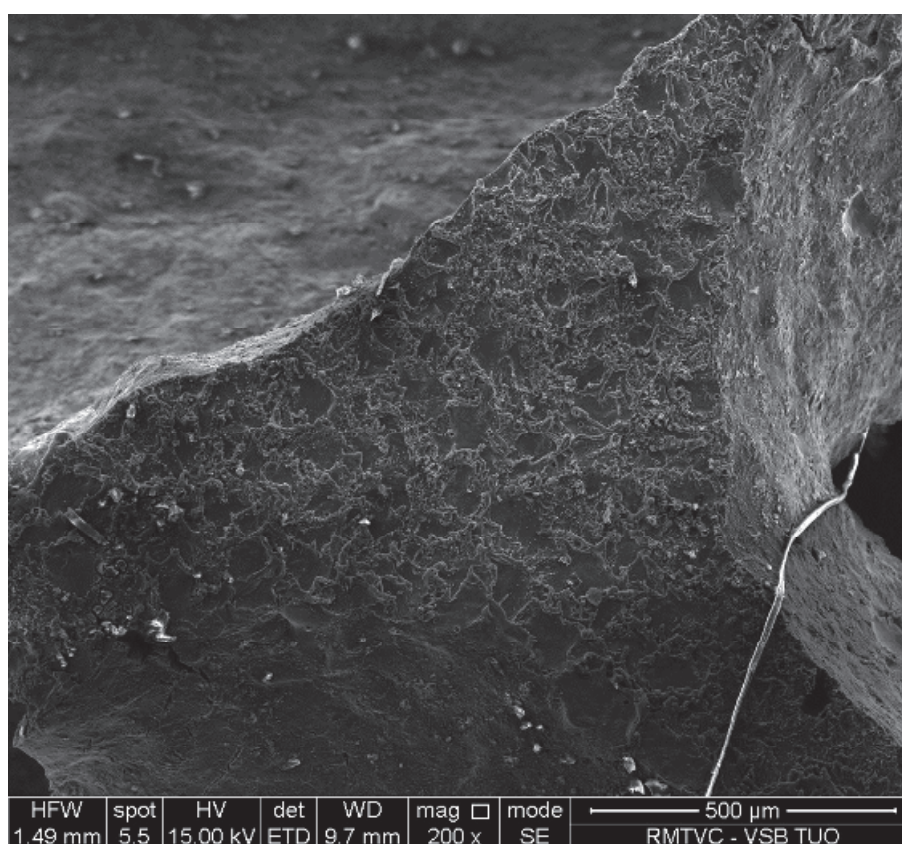
Na Obr. 3.18 je vyobrazeno upnutí válečku Al pěny v SEM pomocí měděného lepicího pásku. Na Obr. 3.19 pak Al pěna snímána metodou BSED a na Obr. 3.20 metodou SE při zvětšení 200x.



Obr. 3.18 Upnutí válečku Al pěny

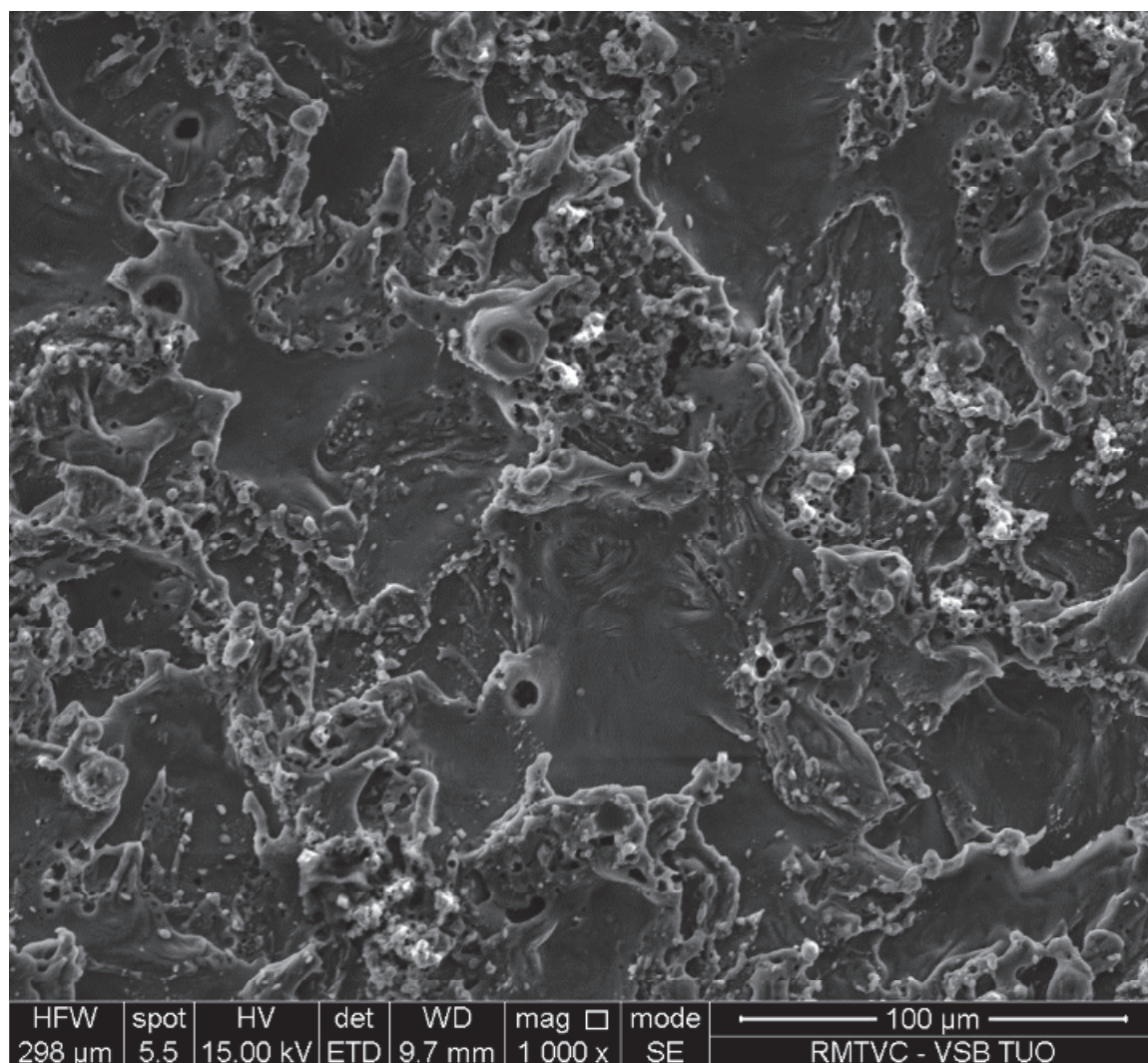


Obr. 3.19 Snímek Al pěny metodou BSED při zvětšení 200x

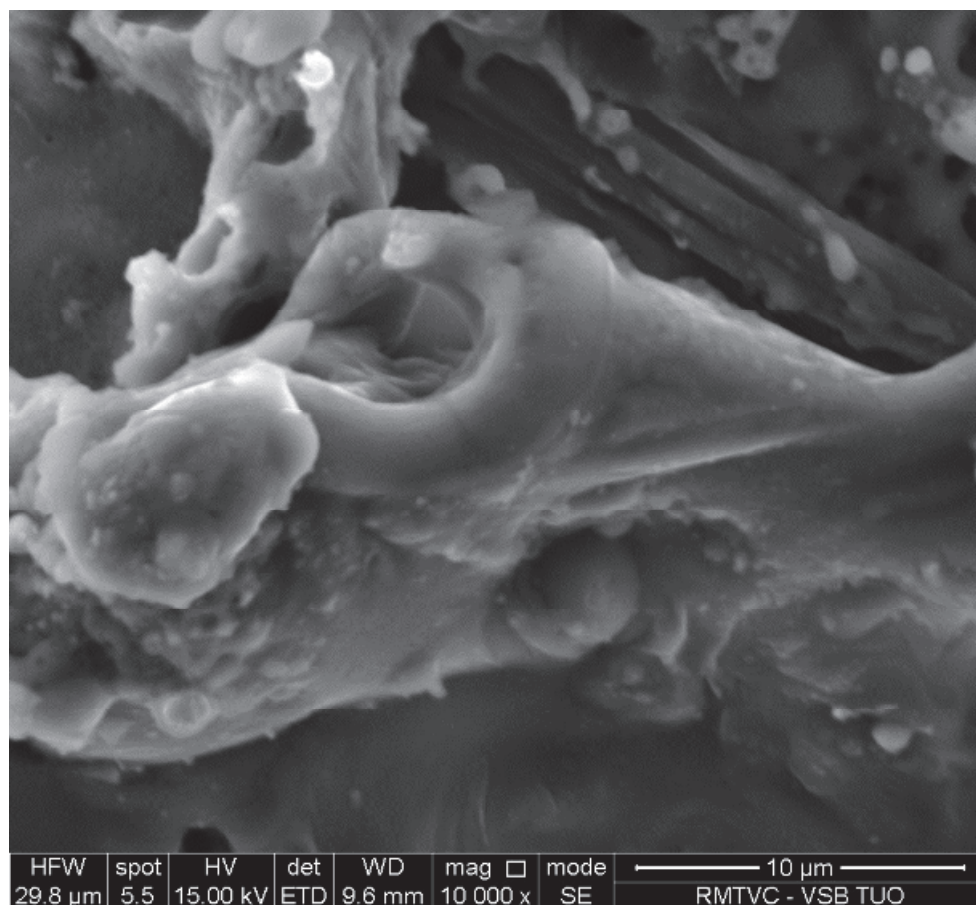


Obr. 3.20 Snímek Al pěny metodou SE při zvětšení 200x

Na dalším obrázku 3.21 při zvětšení 1000x a obrázku 3.22 při zvětšení 10 000x které byly pořízeny ze stejného místa, jako obrázek 3.20. Lze pozorovat detailnější strukturu natavení v místě průchodu drátové elektrody. Zejména na Obr 3.22 je vidět zformování struktury po tepelné přeměně vlivem elektroeroze, tlakem kovových par a chladicího účinku dielektrika. Vzniklé krátery určují tvar a strukturu povrchu. Odmrštěné částice tlakem kovový par, které neodnesl proud dielektrika, tuhnou v různých fázích a tvarech podle velikosti výboje a množství odtaveného materiálu. Lépe tavitelné částice se odpaří a plně oddělí od povrchu, ostatní vytvoří výčnělky, které po průchodu drátové elektrody vytváří povrchovou strukturu.

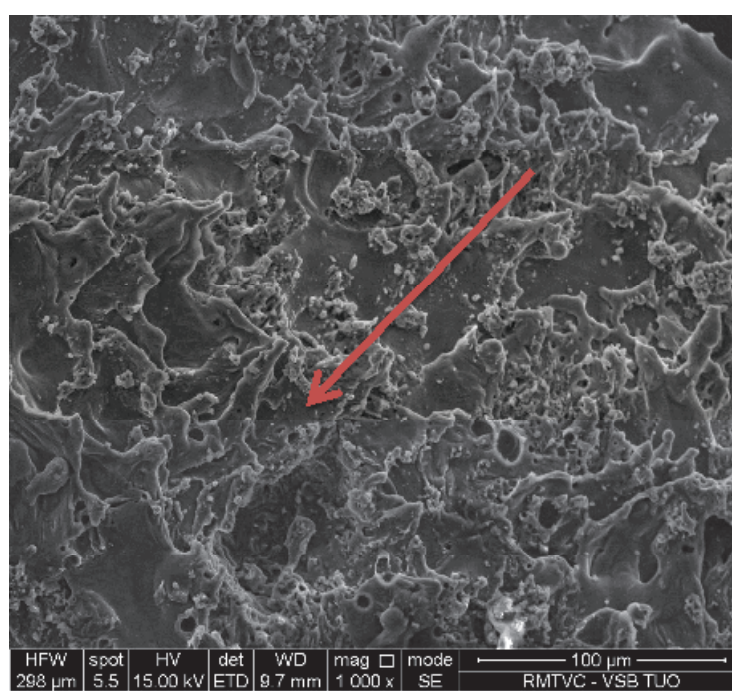


Obr. 3.21 Snímek Al pěny metodou SE při zvětšení 1000x



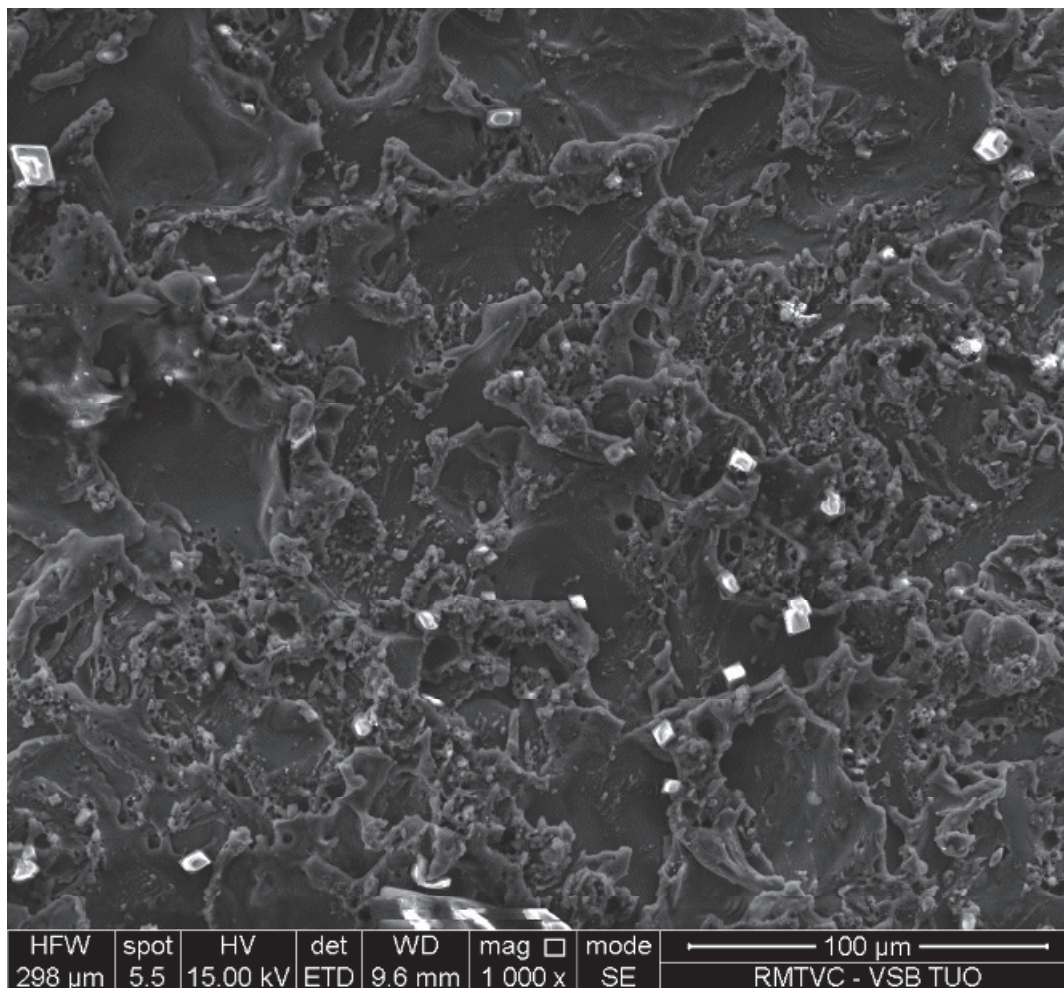
Obr. 3.22 Snímek Al pěny metodou SE při zvětšení 10 000x

V jiném místě ze snímaného válečku Al pěny lze pak vidět strukturu chladnutí povrchu po řezu tak, že lze pozorovat směr (označený šipkou), kterým byl řez proveden, viz Obr. 3.23 při zvětšení 1000x.



Obr. 3.23 Snímek Al pěny metodou SE při zvětšení 1000x

V dalším místě řezu byla spatřena oblast s výskytem oxidů. Po chemické analýze bylo naměřeno 60 hm% Al, 39 hm% oxidů a 1 hm% Ca. Toto místo lze pozorovat na Obr. 3.24. kde oxidy tvoří světlá místa na obrázku. Vznik oxidů v takovém měřítku mohl být způsoben neustálenými výboji, které mohly vzniknout v trhlinách části Al pěny z které je obrázek pořízen.



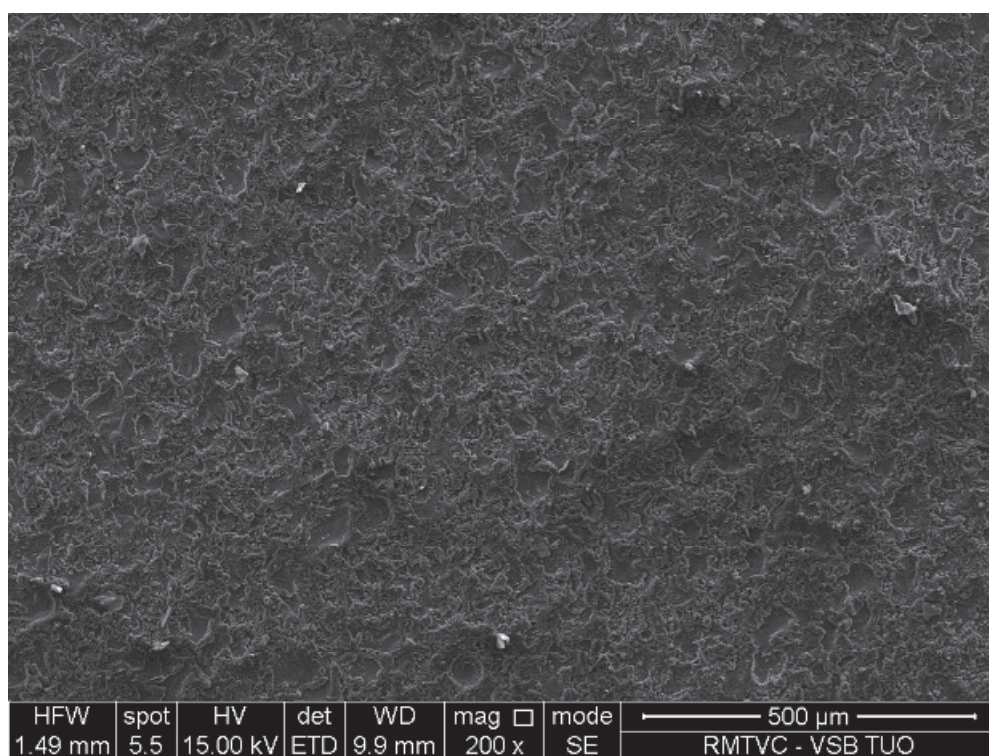
Obr. 3.24 Snímek Al pěny s oxidy mezi trhlinami v struktuře řezu při zvětšení 1000x

Dalším ukazatelem chování po WEDM bylo chemické složení Al pěny po řezu změřené SEM, viz Tab. 3.21. Z té je patrné, že po vzniku pórů došlo k úplnému odpaření TiH_2 a po řezu mosaznou drátovou elektrodou technologií WEDM k mírnému legování povrchu mědi v průměru na 3,65 Cu hm. %. Bylo měřeno i ve větší hloubce zvýšením výkonu SEM, výsledky se však v závislosti na oblasti výrazně rozcházely. Obecně lze ale říci, že s větší hloubkou roste čistota Al hm. % a klesá podíl mědi.

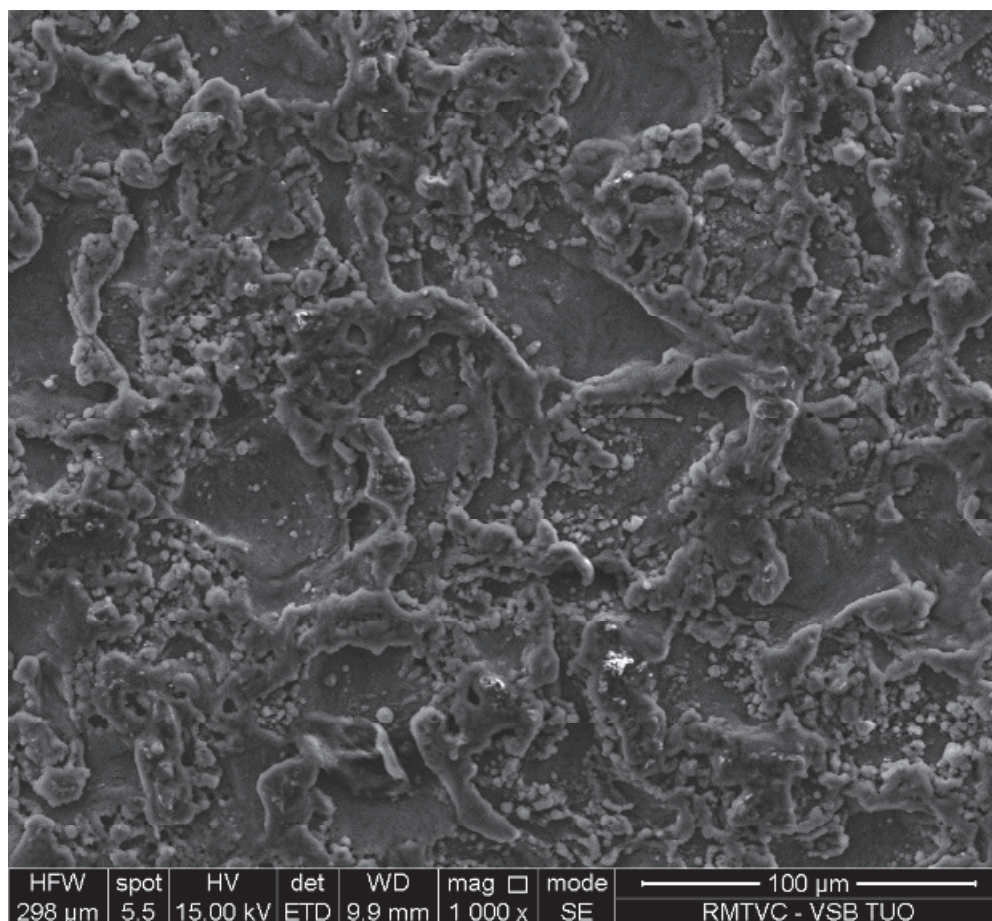
Tab. 3.21 Chemické složení Al pěny po řezu WEDM

Chemické složení pěny po řezech			
	[hm. %]		
Měření	Al	Ca	Cu
1.	93,33	1,36	4,39
2.	92,78	1,4	4,4
3.	96,45	1,42	2,12
4.	93,65	1,32	3,7
Průměr	94,05	1,37	3,65

Také celistvý hliník byl snímán SEM. Na obrázcích 3.25 při zvětšení 200x a 3.26 při zvětšení 1000x lze oproti Al pěně vidět ucelená struktura, nenarušená přerušovanými výboji.



Obr. 3.25 Celistvý hliník při zvětšení 200x



Obr. 3.26 Struktura povrchu celistvého Al při zvětšení 1000x

3.3.4 Měření drsnosti celistvého hliníku

Váleček i otvor po řezu WEDM byly měřeny také na drsnost povrchu přístrojem **Mitutoyo SURFTEST SJ-210 Series**. Jako příslušenství byly k dispozici granitový měřicí stojan s T drážkou a příruční strojní svěrák pro upnutí obrobků. Byly sledované parametry: průměrná aritmetická úchylka profilu Ra, Nejvyšší výška nerovností profilu Rz a průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu Rq.[22]

Váleček byl měřen 9x (na třech roztečích v třech místech) a to tak, že bylo provedeno měření drsnosti na jedno upnutí 3x podélně – v dolní části válečku, ve středu a v horní části. Pak byl váleček potočen o 120° a měření se opakovalo stejným způsobem. Hodnoty byly zaznamenány do tabulky 3.22. Upnutí součásti a příklad měření je vidět na obrázku 3.27.

Tab. 3.22 Naměřené hodnoty drsnosti válečku z celistvého Al

Typ drsnosti / místo měření	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
Dole	2,881	16,077	3,477
Střed	1,883	13,27	2,449
Na hoře	2,65	15,251	3,249
Dole	2,535	16,512	3,189
Střed	1,425	9,102	1,789
Na hoře	2,853	18,1	3,567
Dole	2,734	16,147	3,336
Střed	2,648	15,14	3,229
Na hoře	3,291	20,602	4,067



Obr. 3.26 Měření drsnosti válečku celistvého Al

Měření drsnosti následovalo u otvoru v celistvém Al po řezu WEDM. Zde vzhledem nemožnosti měřit uprostřed otvoru vzhledem k maximální možné délce výsuvného ramena drsnoměru bylo provedeno měření pouze v horní a dolní části dutiny celistvého Al. Počet měření nahoře i dole 5x. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.23.

Tab. 3.23 Naměřené hodnoty drsnosti válečku z celistvého Al

Číslo měření	Vyřezaný otvor – horní část Typ drsnosti [μm]			Vyřezaný otvor – dolní část Typ drsnosti [μm]		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
1.	3,248	17,421	3,900	3,014	18,952	3,740
2.	3,142	16,118	3,720	2,925	15,931	3,564
3.	3,626	22,639	4,496	3,201	15,506	3,793
4.	3,504	18,885	4,204	2,650	15,513	3,267
5.	3,357	18,463	4,059	2,967	16,119	3,638

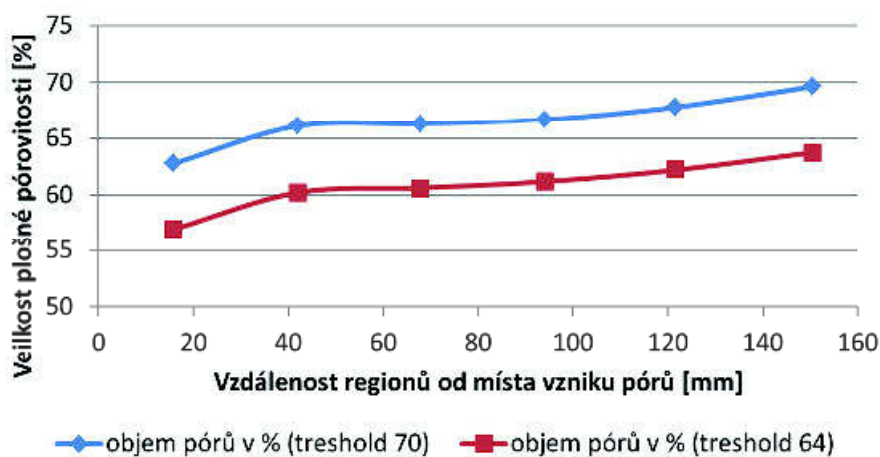
4 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Naměřená data získané z měření součástí po experimentální části práce byly použity pro technické vyhodnocení. Některé data byly pro lepší grafické znázornění zprůměrovány, byly spočítány standardní nejistoty typu A a porovnány závislosti měřených veličin mezi sebou.

4.1 Objem pórů

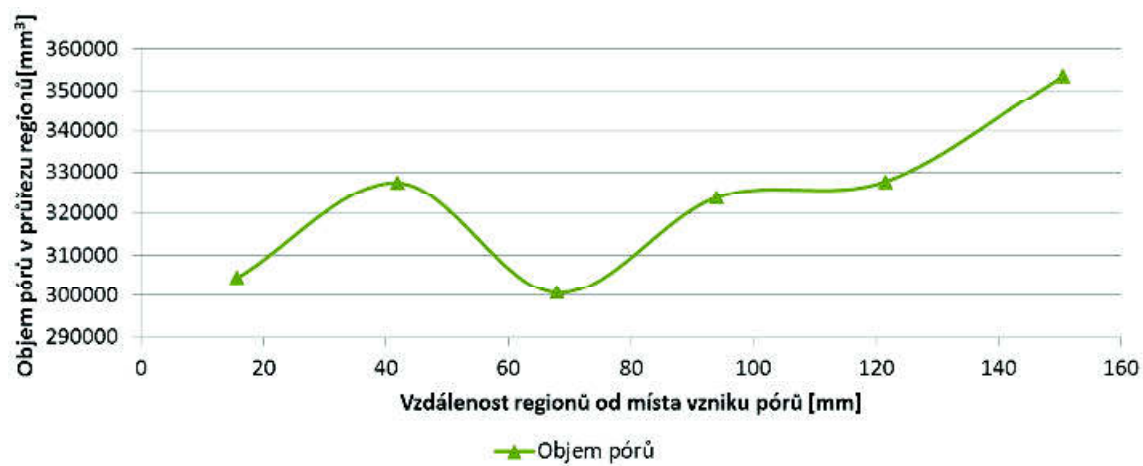
Pro určení vlivu pórovitosti na rozměry průměrů válečků Al pěny byly vyhodnoceny data z Tab. 3.19 a 3.20. Na obrázku 4.1 je vyobrazený průběh pórovitosti podle parametru threshold, na obrázku 4.2 pak podle objemu v jednotlivých regionech.

Na Obr. 4.1 Z obrázku 4.1 vyplývá, že velikost prahové hladiny nemá vliv na jednotlivé oblasti, u obou hladin threshold vychází stejný průběh pórovitosti. Rozdíl mezi malými a velkými póry při threshold 64 je 6,87 % a u threshold 70 činí rozdíl 6,76%, což je vzhledem k průběhu vytváření pórů v stabilních mezích. Průměrná pórovitost zkoumané Al pěny je 63,7 %



Obr. 4.1 Objem pórů podle prahových hladin šedi threshold

Na obrázku 4.2 je vidět objemový průběh pórovitosti. Nárůst objemu pórů není tak plynulý jak u plošného sledování pórovitosti, v regionu 3 je dokonce propad v objemu pórů oproti plošnému sledování pórů, které má nárůst objemu pórů plynulý. Takže lze předpokládat, že uvnitř polotovaru se nachází oblast s nižší pórovitostí. To může být spojeno s technologií výroby Al pěny.



Obr. 4.2 Objem pórů v jednotlivých regionech

4.2 Zpracování rozměrů průměrů válečků

Z naměřených průměrů válečků v jednotlivých výškách měření (Tab. 3.14 a Tab. 3.17) byla vytvořena tabulka průměrných hodnot \bar{x} pro každou výšku, druh pórů a také celistvého Al podle rovnice 4.1 [21], viz Tab. 4.1 spočítaná v programu Microsoft Excel 2010 (MS Excel), z které byly vytvořeny grafy průběhu řezu v malých a velkých pórech.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

x_i ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x

n ... počet měření

\bar{x} ... výběrový průměr

4.2.1 Zpracování průměrů válečků Al pěny

Prvním krokem pro vyhodnocení dat, bylo zprůměrovat naměřené hodnoty.

Tab. 4.1 Zprůměrované hodnoty průměrů válečků pro malé a velké póry

Zprůměrované hodnoty měření průměrů v jednotlivých částech měření		
Místo měření [mm]	Průměry válečků - Velké póry [mm]	Průměry válečků - Malé póry [mm]
0,0	22,013	22,016
20,00	22,008	22,008
40,00	21,994	21,995
60,00	22,008	22,009
80,00	22,008	22,011
100,00	22,018	22,019

Z rovnice 4.1, 4.2 a Tab. 4.1 lze pak stanovit průměrnou hodnotu válečků ve velkých a malých pórech Al pěny. Pro velké póry byl spočítán průměr $D_{VP} = (22,006 \pm 0,009)$ mm a pro malé póry $D_{MP} = (22,010 \pm 0,009)$ mm \Rightarrow střední velikost průměrů pro Al pěnu $D_P = (22,008 \pm 0,009)$ mm. Dále pak z Tab. 3.14 „Naměřené hodnoty průměrů válečků Al pěny“ lze konstatovat, že byly dodrženy

předepsané rozměry velikosti válečku pro potřeby mechanických zkoušek $\varnothing 22^{+0,1}_{-0,05}$ mm.

Pro vyjádření intervalu hodnot kolem výsledku měření pro grafické znázornění byla spočítaná standardní nejistota typu A (u_A) (jejíž rozptyl je charakterizován směrodatnou odchylkou $s(\bar{x})$). Z naměřených hodnot z Tab. 3.14, která byla spočítaná podle rovnice 4.2 [21] v MS Excel, viz Tab. 4.2.

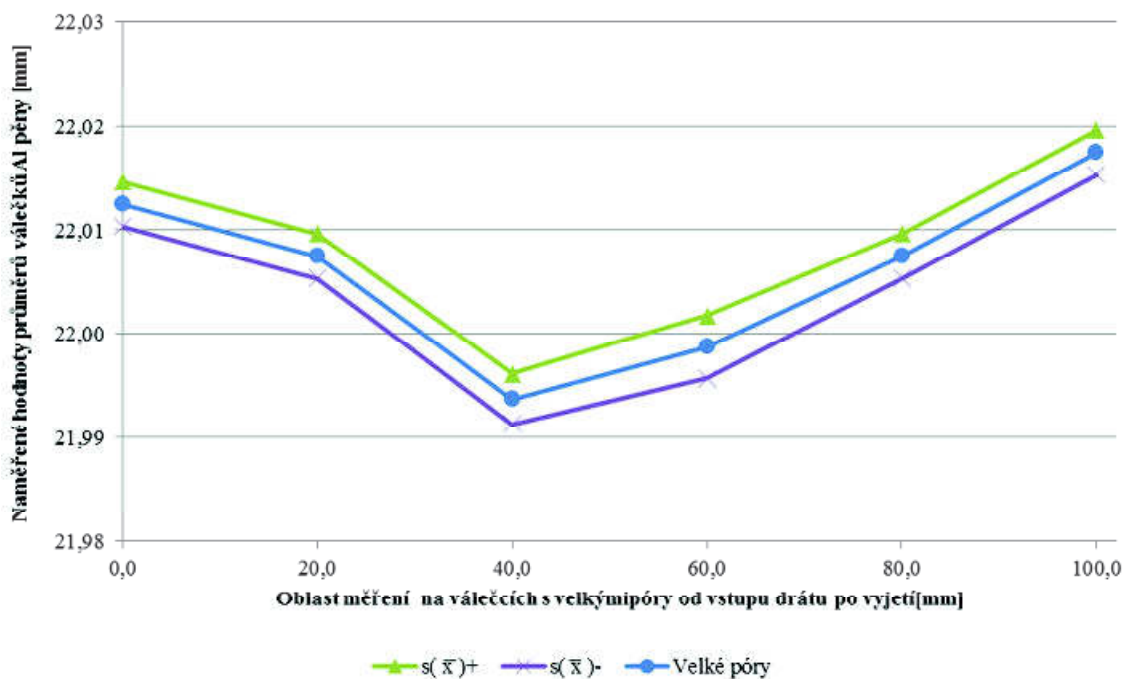
$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (4.2)$$

Tab. 4.2 Směrodatné odchylky průměrů válečků Al pěny

Směrodatné odchylky u_A		
Místo měření [mm]	Velké póry [mm]	Malé póry [mm]
0,0	0,002	0,004
20,00	0,002	0,005
40,00	0,004	0,005
60,00	0,005	0,005
80,00	0,003	0,003
100,00	0,003	0,002

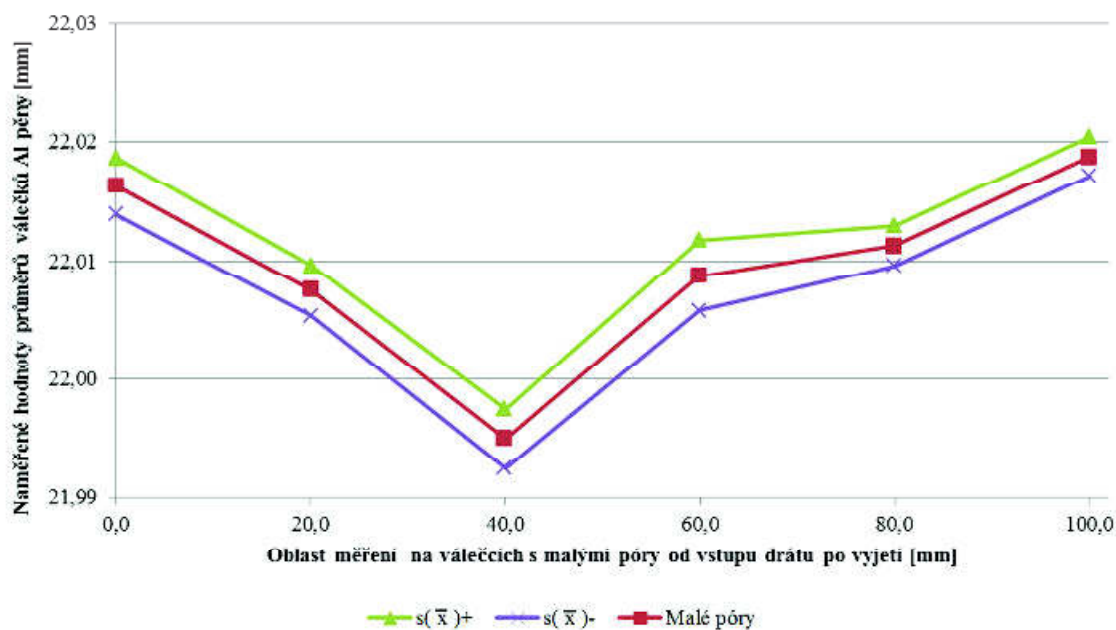
Z hodnot tabulek 4.1 a 4.2 pak byly vytvořeny grafy, viz Obr. 4.3, 4.4 a 4.5 kde je vidět průběh průměrů válečku během řezu od vstupu drátu do Al pěny do výstupu.

Z Obr. 4.3 je patrné, že průběh řezu ve velkých pórech má vydutý tvar s největším propadem v horní čtvrtině řezu. To je způsobeno v důsledku nastavení serva a citlivosti serva, aby byl řez vzhledem k výšce plynulý a nedocházelo tak k přetržení drátu a také je to oblast s nejhorším přístupem dielektrika – vyšší výskyt zbytků částic po odtavení drátovou elektrodou.



Obr. 4.3 Porovnání rozměrů válečků Al pěny s velkými póry

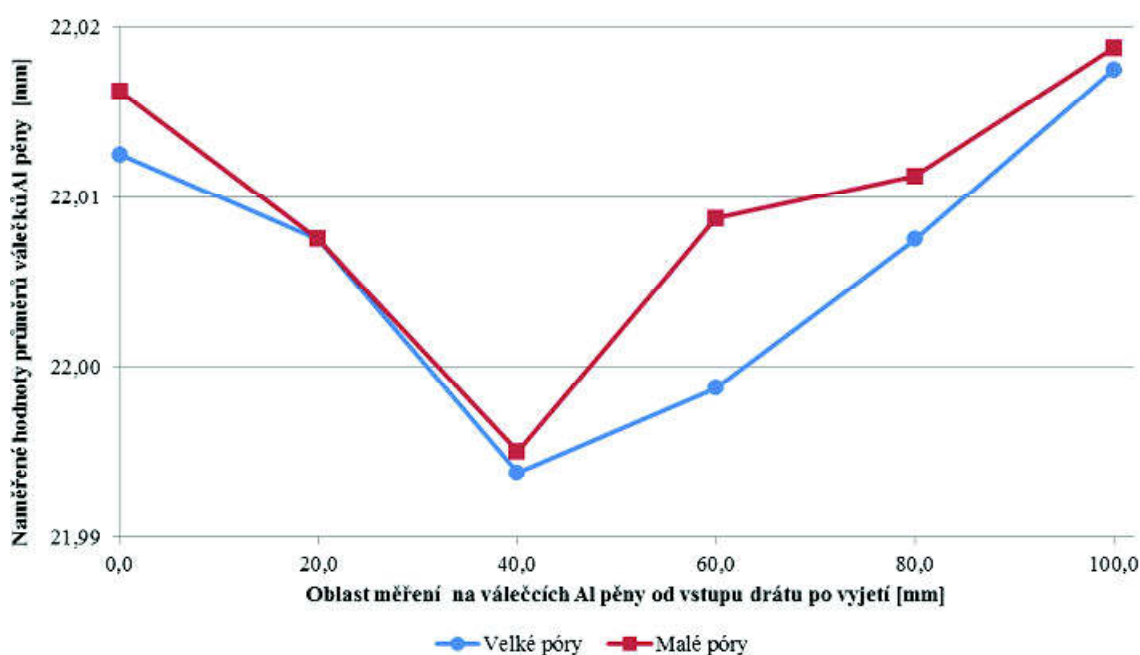
Na Obr. 4.4 je vyobrazen průběh rozměrů průměrů v řezech s malými póry Al pěny. Stejně jak u řezů ve velkých pórech má průběh vydutý tvar s ostrým propadem v hlubce 40 mm od vstupu drátové elektrody.



Obr. 4.4 Porovnání rozměrů válečků Al pěny s malými póry

Na Obr. 4.5 je srovnání průběhu velikosti průměrů mezi malými a velkými póry Al pěny. Hlavní průběh se u obou oblastí od sebe příliš neliší a lze tedy říci, že rozdíl

velikosti pórů v měřítku, v kterém se vyskytují u zkoumaného polotovaru, nemá přímý vliv na rozměry válečků. V druhé polovině výšky řezu je nepatrný rozdíl rozměrů (0,01mm), což mohlo být důsledkem vyšší stability komplexního výboje mezi drátovou elektrodou a obrobkem v méně pórovité oblasti. Rozměry na vstupu u obou oblastí řezu Al pěny jsou nepatrně menší než na výstupu drátu z řezu. To je dáno opotřebením drátové elektrody výboji po průchodu celou výškou řezu, kdy na konci je vzdálenost mezi drátovou elektrodou a obrobkem nepatrně větší.



Obr. 4.5 Srovnání řezů Al pěny mezi malými a velkými póry

4.2.2 Zpracování průměrů válečků celistvého Al

Stejně tak jak u Al pěny, byly nejprve zprůměrovány hodnoty v jednotlivých místech měření podle rovnice 4.1, viz Tab. 4.3

Tab. 4.3 Zprůměrované hodnoty průměrů válečku celistvého Al

Zprůměrované hodnoty měření průměrů v jednotlivých částech měření	
Místo měření [mm]	Hodnoty zprůměrovaných měření \varnothing [mm]
0,0	21,980
20,00	21,943
40,00	21,920
60,00	21,925
80,00	21,938
100,00	21,813

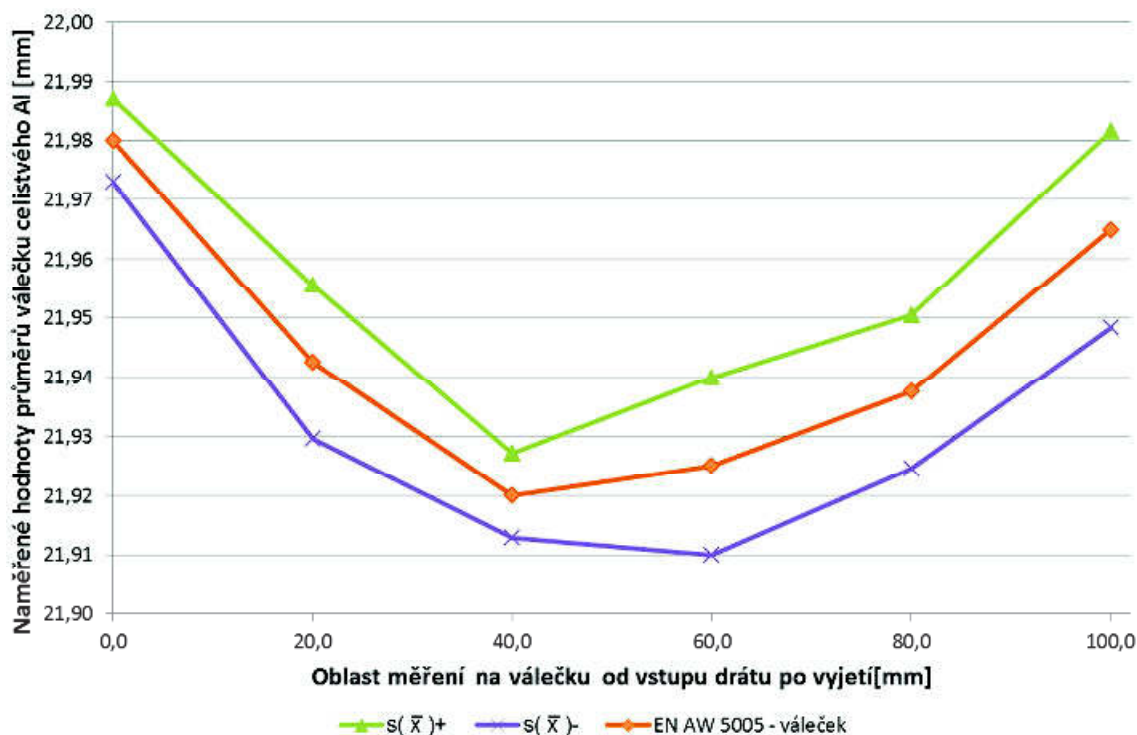
Z tabulky 3.17 a rovnic 4.1 a 4.2 pak byl určen střední průměr válečku $D_C = (21,945 \pm 0,012)$ mm.

Stejně jak u Al pěny, byla spočítána podle rovnice 4.2 i pro celistvý hliník standardní nejistota typu A. Z výsledných hodnot nejistot Tab. 4.4 a Tab. 4.3 byl pak sestaven graf, viz Obr. 4.4.

Tab. 4.4 Směrodatné odchylky průměrů válečku celistvého Al

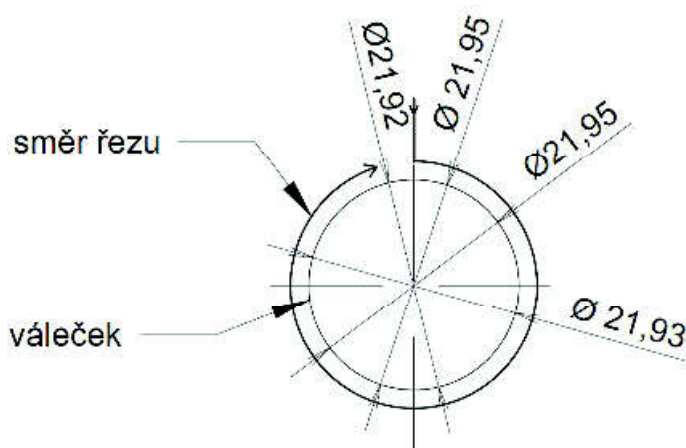
Směrodatné odchylky u_A	
Místo měření [mm]	Spočítané hodnoty [mm]
0,0	0,007
20,00	0,013
40,00	0,007
60,00	0,015
80,00	0,013
100,00	0,017

Na Obr. 4.4 je vidět značné vydutí. To je vlivem řezu v plném materiálu, nutného zvýšení výkonu serva pro prořez takovéto výšky, horšího přísunu dielektrika do místa řezu uprostřed válečku (vhodnější by bylo řezeat s úplným ponorem obrobku v dielektriku). Směrodatné odchylky na vstupu drátové elektrody rostoucí trend k výstupu drátové elektrody z řezu. To je dáno především kvůli značnému opotřebení drátové elektrody během řezu zkrš obrobek. Díky zanechání stejné korekce řezu z parametrů u Al pěny lze pozorovat, že nebylo v žádném bodě měření naměřena hodnota nastaveného průměru válečku $\varnothing 22$ mm. To bylo dáno stejně jak u vydutí zvýšenými parametry pro prořez a zvýšeným opotřebením drátové elektrody.



Obr. 4.6 Porovnání rozměrů válečku celistvého Al

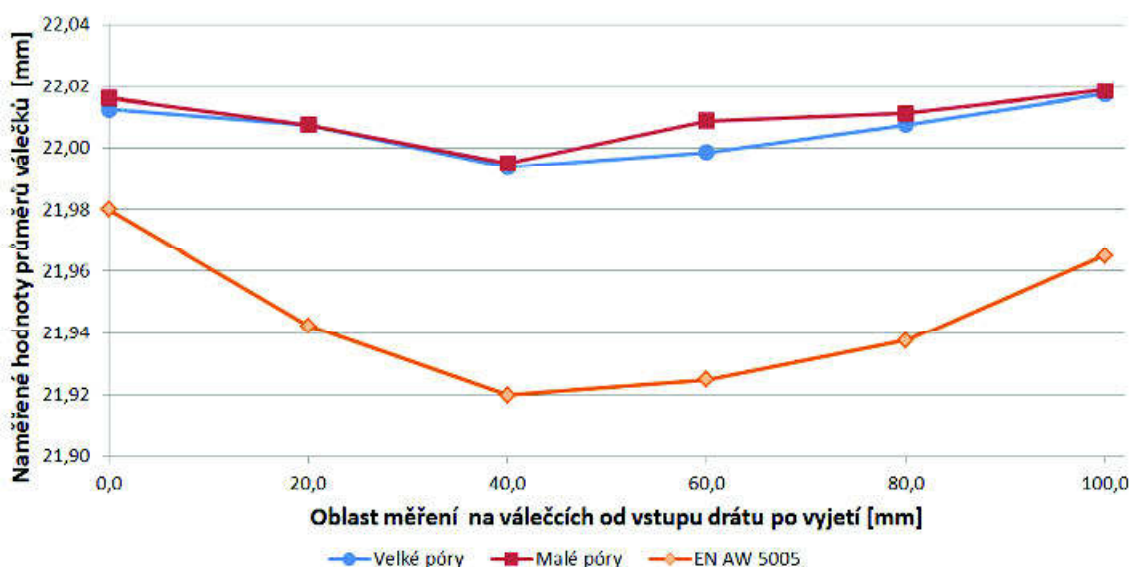
Během průběhu měření válečku byl zpozorován trend změny průměru ve všech výškách měření. Na Obr. 4.5 je uveden příklad ze vzálenosti 80 mm od horní hrany obrobku. Je patrné, že rozměr s průběhem řezu klesal, to bylo dáno vysokou tepelnou vodivostí celistvého Al a docházelo tak přejímání velkého množství tepla z výbojů jak do válečku tak i obrobku. Tím pádem v průběhu řezání došlo tepelné roztažnosti a místo řezu tvaru pravidelného kruhu došlo po schládnutí součásti k tzv spirálovému efektu.



Obr. 4.7 Průběh kruhovitosti celistvého Al

4.2.3 Porovnání průměrů válečků Al pěny a celistvého Al

Z grafů na obrázcích 4.3 a 4.4 pak lze porovnat rozměry průměrů válečků mezi plným a pórovitým materiálem. Na grafu je patrné vydutí u obou polotovarů, avšak u řezů v Al pění je tento projev znatelně menší. To bylo důsledkem faktorů ovlivňujících průběh řezu a vlastnostmi obou materiálů. Al pěna díky své cca 60x nižší tepelné vodivosti, než celistvý Al nepřejímá tolik tepla při řezu, není prořezáván celý průřez objemu v parametru výšky řezu, takže není za potřebí tak velkého množství dielektrika pro chlazení a tvorbu výbojů jak u celistvého Al. I když dochází k nepravidelnému opotřebení drátové elektrody v Al pění, tak při řezu v celistvém hliníku dochází vlivem většího opotřebení k zúžení drátové elektrody natolik, že nemohlo být nastaveno stejné předpětí drátu jako u Al pěny, což se také projevilo na výsledku rozměrů průměru a vydutí válečku kompaktního Al.



Obr. 4.8 Porovnání mezi rozměry průměrů Al pění a celistvým Al

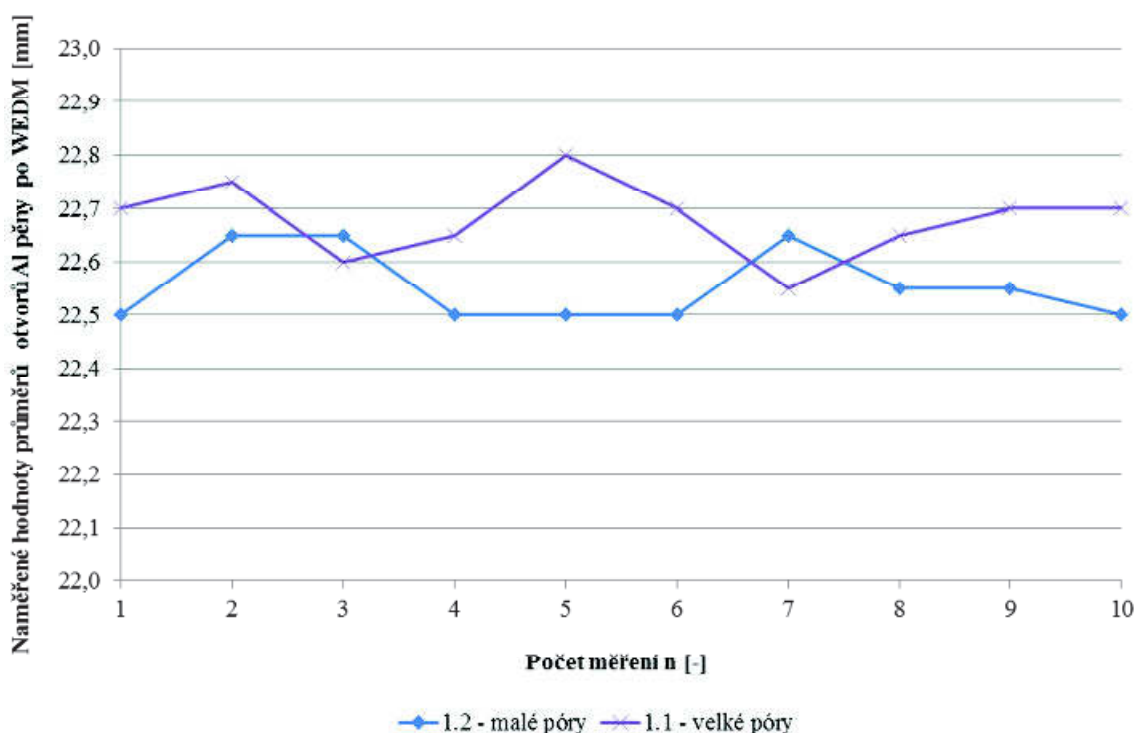
4.3 Porovnání rozměrů průměrů otvorů

Jelikož byly otvory v Al pění měřeny posuvným měřítkem, které využívá pro měření otvorů dvou úzkých dotyků, tak lze naměřené hodnoty považovat pouze za orientační. Jelikož je zde mnoho faktorů mající vliv na výsledek měření, např.: úzké doteky měřidla mohly nepřesně dosednout mezi póry a ovlivnit tak měření, nemožnost nastavení síly přitlaku na doteky a tím možné deformace tenkých stěn mezi póry, možnost měření pouze na hranách otvorů. Jiný postup byl zvolen u celistvého Al, který díky své tuhosti mohl být po celé své délce měřen dutinoměrem.

4.3.1 Porovnání otvorů Al pěny

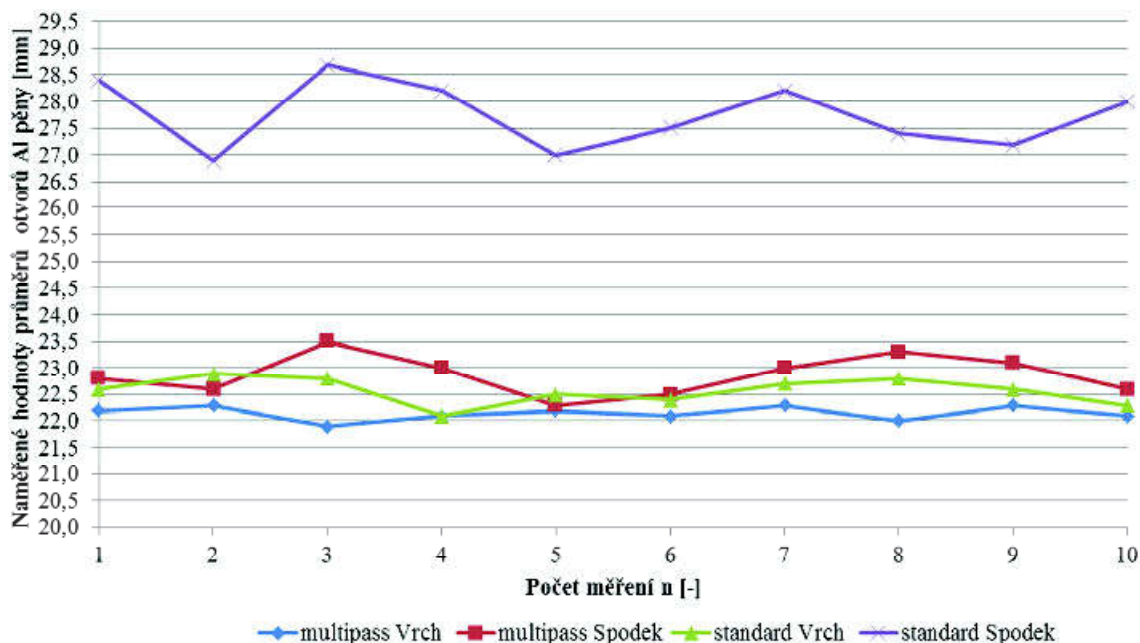
Výsledek měření je vyobrazen na Obr. 4.9, kde jsou porovnány řezy v Al pění technologií WEDM. Na Obr. 4.10 pak jsou porovnány otvory po řezu technologií vodního paprsku.

Z Obr. 4.9, Tab. 3.15 a rovnic 4.1 a 4.2 byla určena průměrná hodnota průměru otvoru Al pěny $D_{PO} = (22,6 \pm 0,11)$ mm. Rozdílem hodnot středního průměru otvoru D_{PO} a průměrného průměru válečků D_P , pak vyplývá, že velikost řezné mezery je přibližně 0,592 mm a velikost jiskrové mezery po odečtení \varnothing drátu 0,25 mm je 0,342 mm v řezu Al pěny.



Obr. 4.9 Porovnání rozměrů otvorů mezi malými a velkými otvory

Na Obr. 4.10 lze pozorovat průběh řezu po řezu technologií vodním paprskem. Stejně jak u technologie WEDM lze pomocí rovnic 4.1, 4.2 a Tab. 3.16 určit průměrnou hodnotu průměrů otvorů. Pro metodu multipass byla spočítána průměrná velikost průměru $D_{PWOM} = (22,50 \pm 0,16)$ mm a pro metodu standard průměrná velikost průměru $D_{PWOS} = (25,20 \pm 0,30)$ mm. Z výsledků průměrných průměrů otvorů s ohledem na průměr vodní trysky 0,33 mm není technologie WJM z důvodů velkých nepřesností řezů vhodná pro vysoké řezy v Al pění.



Obr. 4.10 Porovnání rozměrů otvorů po WJM v Al pění

4.3.2 Zpracování otvoru celistvého Al

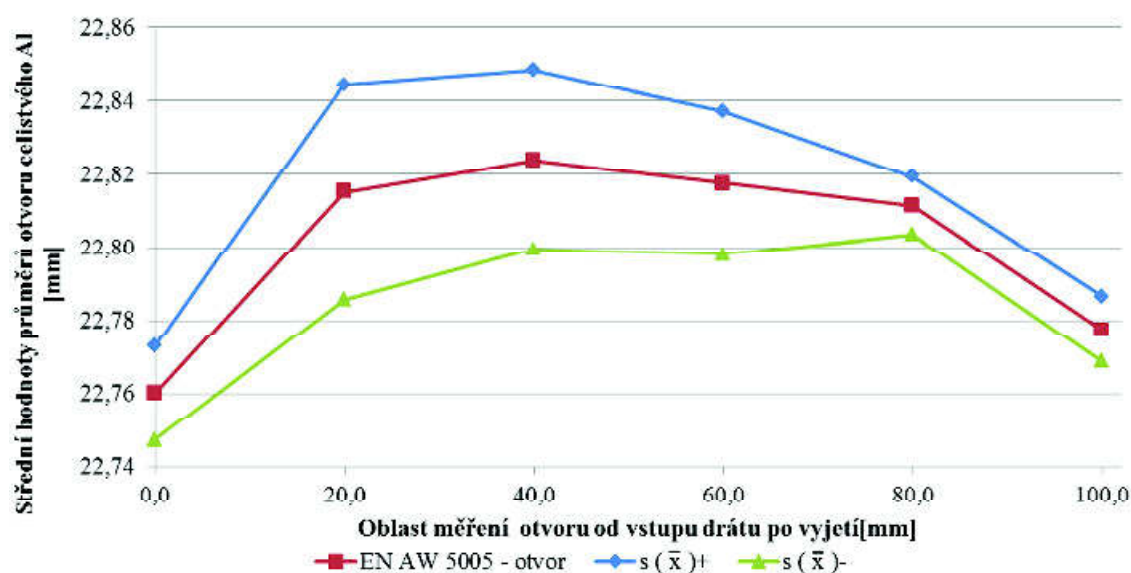
Na rozdíl od Al pěny, bylo možné u celistvého hliníku měřit otvor dutinoměrem. Z Tab. 3.18 a rovnic 4.1 a 4.2 byl spočítán průměrný průměr otvoru celistvého Al (Tab. 4.5) a standardní nejistota typu A (Tab. 4.6) $\Rightarrow D_{CO} = (22,801 \pm 0,017)$ mm. Rozdílem hodnot průměrného průměru otvoru D_{CO} a průměrného průměru válečků D_C , pak vyplývá, že velikost řezné mezery je přibližně 0,856 mm a velikost jiskrové mezery po odečtení \varnothing drátu 0,25 mm je 0,606 mm v řezu celistvého Al.

Na Obr. 4.11 jsou rozměry otvoru s vyjádřením nejistoty okolo průměrné hodnoty průměrů otvoru celistvého Al, které vycházejí z tabulek 4.5 (průměrné hodnoty měření otvorů v jednotlivých výškách měření), 4.6 (směrodatných odchylek) a rovnic 4.1 a 4.2. Lze pozorovat výrazně vypouklý tvar, který způsobilo především malé předpětí drátu,

kteře na danou výšku bylo nastaveno kvůli vyšší hodnotě přívodu elektrického proudu, a také vzhledem k výšce řezu byl zhoršený přívod dielektrika do vnitřní části řezu. Přesnějšího rozměru bylo dosaženo v horní části díky neustálého přívodu nového drátu do místa řezu. V prostřední části byly zaznamenány zvýšené hodnoty nejistoty měření, které mohly být způsobeny zhoršeným přístupem měřidla v těchto místech a obtížná manipulace s polotovarem tvaru válce během měření.

Tab. 4.5 Průměrné hodnoty průměrů válečku celistvého Al

Průměrné hodnoty měření průměrů v jednotlivých částech měření	
Místo měření [mm]	Hodnoty zprůměrovaných měření \varnothing [mm]
0,0	22,760
20,00	22,815
40,00	22,824
60,00	22,818
80,00	22,811
100,00	22,778

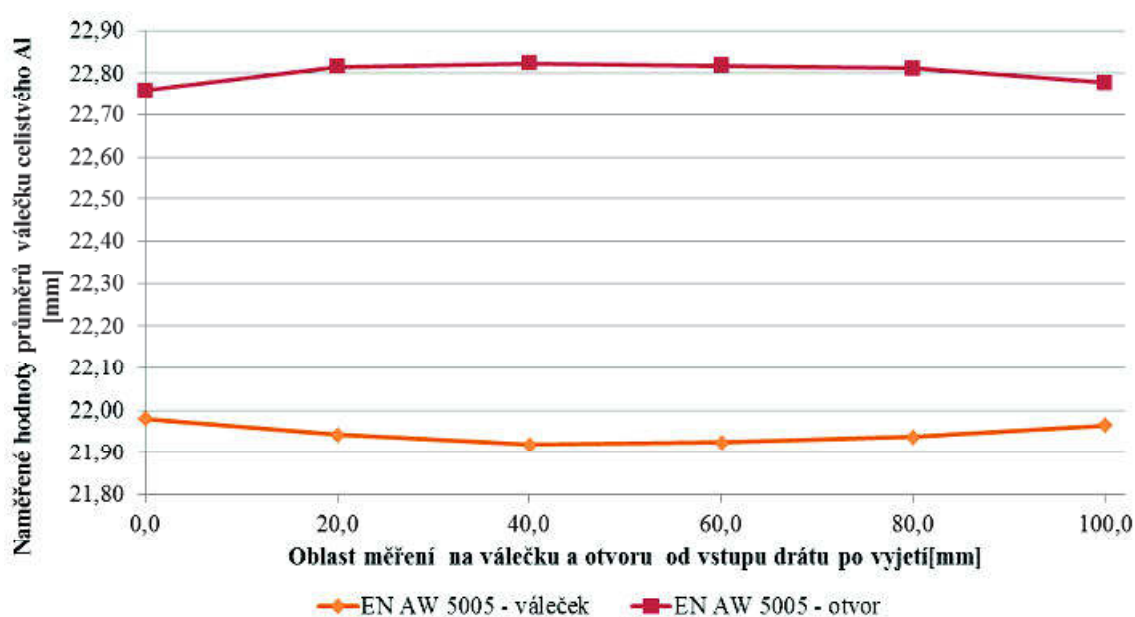


Obr. 4.11 rozměry otvoru s vyjádřením nejistoty okolo střední hodnoty průměrů otvoru celistvého Al

Tab. 4.6 Směrodatné odchylky průměrů válečku celistvého Al

Směrodatné odchylky u_A	
Místo měření [mm]	Spočítané hodnoty [mm]
0,0	0,013
20,00	0,029
40,00	0,025
60,00	0,020
80,00	0,008
100,00	0,009

Na Obr. 4.12 je pak srovnání rozměrů válečku s rozměry otvoru. Výsledné křivky vytvořily tzv. barelový efekt, který je pro tuto technologii typický. Uprostřed tohoto „barelu“ je oblast řezu s jiskrovou mezerou na vnitřních stranách křivek.



Obr. 4.12 Porovnání rozměrů válečku a otvoru celistvého Al

4.4 Porovnání technologických parametrů

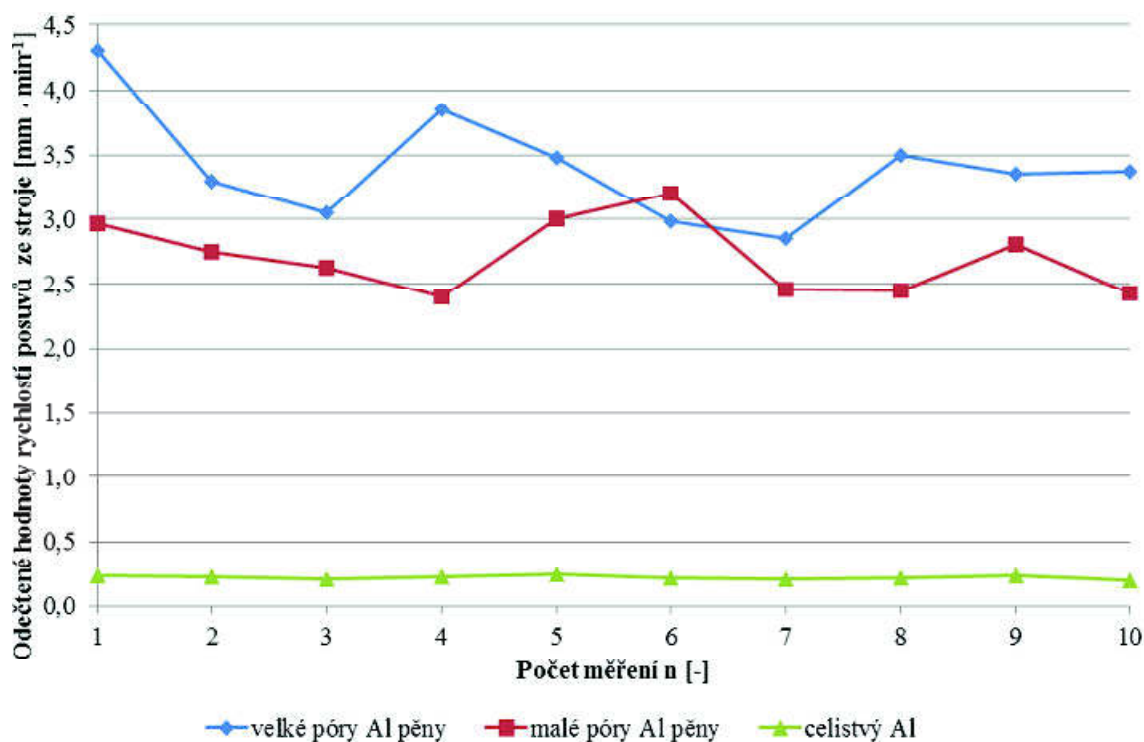
Z technologického hlediska byly porovnány parametry:

- rychlost posuvů pro jednotlivé řezy v_f
- čas řezu jednotlivých válečků t
- spotřeba drátu
- stabilita jiskrové mezery GAP

4.4.1 Rychlost posuvů pro jednotlivé řezy v_f

Z tabulek naměřených rychlostí řezání (přílohy Q a K) byl vytvořen graf průběhu rychlosti řezů, viz Obr. 4.13.

Z Obr. 4.13 je patrný vliv pórovitosti na velikosti rychlosti řezání a stabilitě rychlosti řezů. Vlivem menšího objemu prořezu přes póry Al pěny je velikost rychlosti 13,2x větší, nežli je tomu u celistvého Al. Oproti tomu je stabilita rychlosti řezu celistvého Al 27,8x lepší nežli u Al pěny.



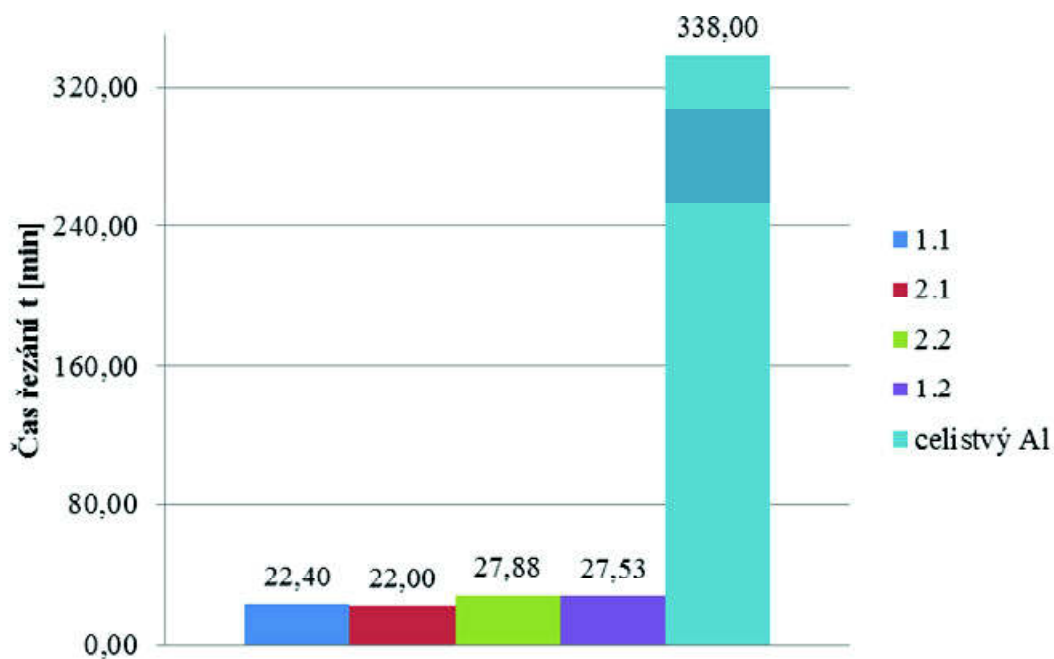
Obr. 4.13 Porovnání rychlostí posuvů řezů WEDM

4.4.2 Porovnání časů řezů válečků

Z hodnot velikosti časů posuvů (uvedených v tabulkách technologických hodnot pro jednotlivé řezy), byl sestrojen graf (Obr. 4.14) určující závislost řezů mezi velkými póry, malými póry a celistvého hliníku.

Z grafu (Obr. 4.14) je patrný stejný trend jako u rychlostí posuvů závislosti řezu mezi Al pěnou a celistvým Al, kdy s rostoucí velikostí prořezu roste i exponenciálně čas potřebný pro řezání (celistvý Al se řezal 13,5x déle). Pokud by totiž platila přímá úměra mezi pórovitým materiálem a celistvým, tak by čas nutný pro vyřezání válečku z Al pěny byl 125 minut.

U porovnání mezi malými a velkými póry, kde je průměrný rozdíl v pórovitosti 6,82% je nárůst času řezu ve velkých pórech o 6,15%

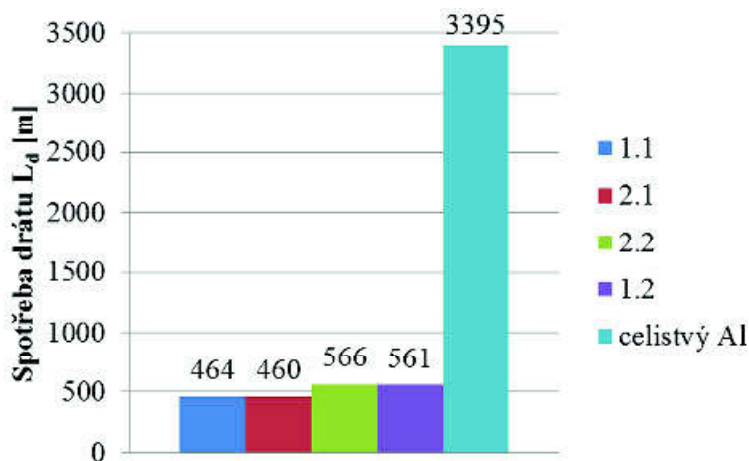


Obr. 4.14 Porovnání časů řezů válečků technologií WEDM

4.4.3 Porovnání spotřeby drátu

Jelikož je spotřeba drátu přímo úměrná na čase, lze předem říci, že bude mít stejný průběh jako graf porovnání času řezů a vyhodnocení tohoto parametru je pomocným činitelem k ekonomickému zhodnocení. (Použitá data jsou uvedených v tabulkách technologických hodnot pro jednotlivé řezy.)

Na grafu (Obr. 4.15) je vidět srovnání spotřeby drátové elektrody z mosazi.



Obr. 4.15 Porovnání spotřeby drátové elektrody

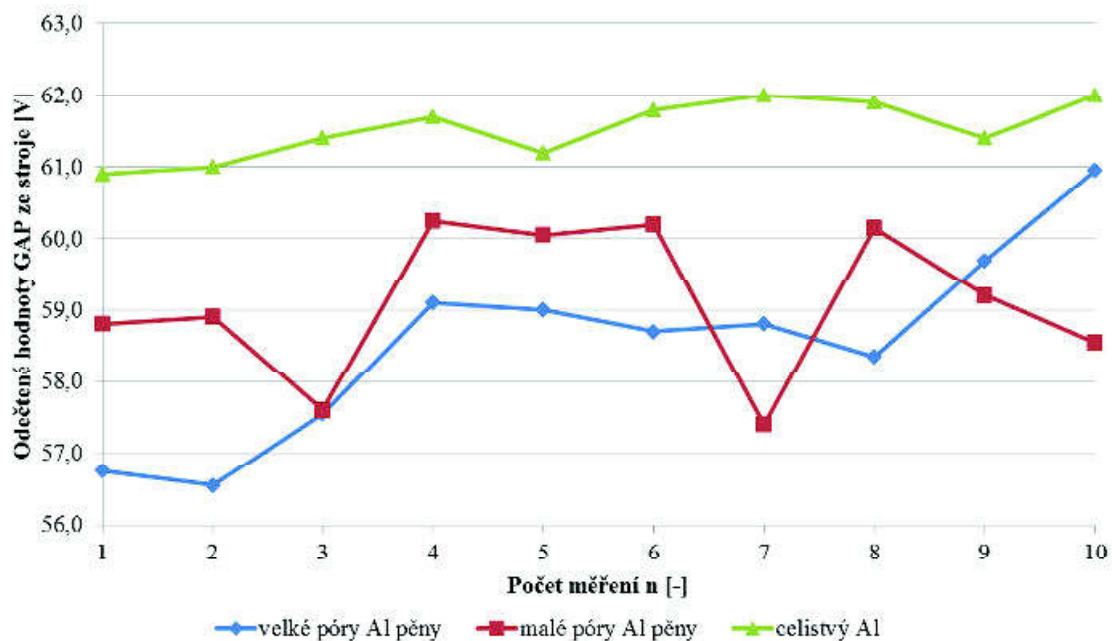
4.4.4 Porovnání stability jiskrové mezery GAP

GAP – parametr, který zabraňuje zkratu drátu tím, že drží jiskrovou mezeru GAP mezi drátem a obrobkem. Na jeho velikosti závisí nejen přesnost, ale především drsnost obrobené plochy. Ze zkušeností se strojem CHMER G32 F, pak lze považovat výboj za stabilní, pokud hodnota GAP má hodnoty na stabilně od přibližně $45V \pm 1,0 V$ do $65 V \pm 1,5 V$.

Z tabulek stability jiskrové mezery (přílohy R a L) byl sestaven graf porovnání tohoto parametru mezi jednotlivými řezy, viz Obr. 4.16.

Z průběhu grafu nelze přímo určit, zda má větší vliv na stabilitu oblast s větší pórovitostí, nebo oblast s pórovitostí menší. V obou případech je průběh nepravidelný a je tedy evidentní, že záleží na tom v jakém místě mezi póry se drátová elektroda nachází – kolik vláken mezi póry musí narušit elektroerozí a přizpůsobit tomu velikost stability jiskrové mezery. Na rozdíl tomu řez v celistvém Al vykazuje značnou stabilitu. Malé

výchyly mohou být způsobeny v určitých místech větší koncentrací stopových prvků přísad (Fe, Si).



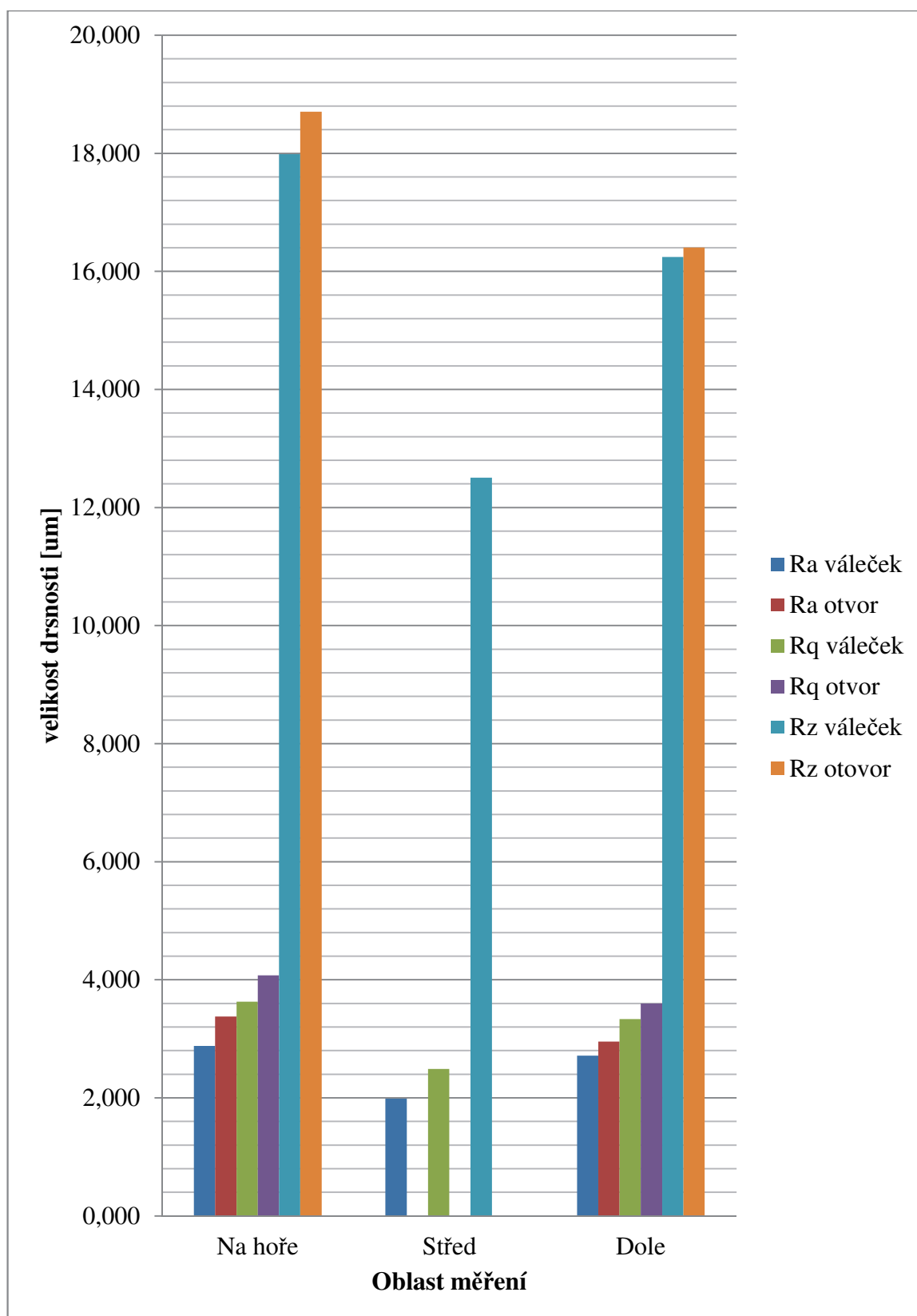
Obr. 4.16 Porovnání stability jiskrové mezery GAP

4.5 Vyhodnocení drsnosti povrchu celistvého Al

Jelikož se WEDM nejedná o obrábění, při kterém nevznikají třísky jako takové a drsnost povrchu povrchu neudává tvar řezného klínu, nýbrž velké množství výbojů elektroeroze, jak lze vidět např. na Obr. 3.21.

Z tabulek 3.22, 3.23 a Obr. 4.17 kde je vyobrazen graficky průběh drsností lze určit, že lepšího povrchu je dosaženo ve středu součásti (to je důsledkem mnoha menších výbojů, které vznikly kvůli špatnému přívodu dielektrika, které by zabránilo těmto výbojům). Pak ve spodní části, kde už byla drátová elektroda oslabená výboji skrz průřez. Vzniká nepravidelný tvar s výstupky na obvodu drátu, které umožňují tvorbu drobnějších výbojů a tím také jemnější strukturu na válečku či otvoru.

Drsnost válečků je ve všech parametrech o trochu lepší. To může být dáno stabilnější vzdáleností od válečku příkazem NC programu na vnitřní korekci, nebo také menším pracovním úhlem drátu, který v směrem k ose válečku odtavuje nepatrné množství méně, nežli na vnější straně drátu, která vytváří povrch otvoru.



Obr. 4.17 Porovnání drsností povrchů po řezech WEDM kompaktního Al

5 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Původní technologie opracování Al pěny způsobovaly velké množství odpadu při zpracování. Část polotovaru, za který bylo provedeno upnutí, nebylo dále možné použít z důvodu destrukce upínací a řezné síly. Bylo nutné použít nákladných přípravků a i přesto bylo zlepšení pouze dílčí, protože nelze u běžných způsobů obrábění vyloučit vliv řezné síly. Proto bylo navrženo využít nekonvenční metody obrábění WEDM, kde upnutí bylo realizováno velkými plochami přitlačných desek a tím byl vliv upínací síly na povrch téměř eliminován.

Al pěna díky své 60x nižší tepelné vodivosti nepřejímá tolik tepla z řezu, není prořezáván celý průřez objemu v parametru výšky řezu, takže není za potřebí tak velkého množství dielektrika pro chlazení a tvorbu výbojů jak u celistvého Al. I když dochází k nepravdělnému opotřebení drátové elektrody v Al pění, tak při řezu v celistvém hliníku dochází vlivem většího opotřebení k zúžení drátové elektrody natolik, že nemohlo být nastaveno stejné předpětí drátu jako u Al pěny, což se také projevilo na výsledku rozměrů průměru válečku celistvého Al.

Použití technologie WJM uvedené pro srovnání mělo své úskalí, ačkoli je tato technologie výrazně rychlejší než WEDM, tak není možné dosáhnout lepší kvality rozměrů. Proto by technologie WJM byla vhodná pro dělení materiálu, kde také odpadá zdeformování upínací části s mnohdy dostačující kvalitou řezu (v závislosti na hloubce řezu) a výraznou úsporou času oproti WEDM (přibližně 4,6 krát) při výšce řezu Al pěny 100 mm, nebo pro řezy tenčích profilů, kde by byly zaručeny rozměry a tudíž by byla tato technologie výhodnější. Problém u WJM by byl při výrobě drobných součástí, pro které by bylo nutné mít přípravek na zachycení po dořezu (hrozilo by propadnutí obrobků do nádrže s vodou s objemem několika metrů krychlových).

5.1 Výrobní náklady válečku /otvorů

Výrobní náklady jednotlivých válečků u WJM bylo stanoveno podle hodinové sazby stroje HS a času řezání podle použité metody (standard, multipass). Celkové náklady na jednotlivé řezy jsou uvedeny v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Celkové náklady řezu otvorů WJM

HS WJM [Kč · h ⁻¹]	Metoda	Čas [h]	Celkové náklady na řez [Kč]
2000	multipass	0,011	21
	standard	0,079	159
			Σ 180

Výrobní náklady válečků technologií WEDM bylo stanoveno podle: ceny práce stroje (hodinové sazby stroje HS, času řezání) a ceny spotřebované drátové elektrody (spotřeby drátu, ceny 1m drátu). Celkové náklady řezu WEDM jsou uvedeny v Tab. 5.2 a cena za jednotlivé válečky v Tab. 5.3.

Tab. 5.1 Celkové náklady řezů válečků

HS WEDM [Kč · h ⁻¹]	Váleček	čas [h]	cena práce [Kč]	cena 1 m drátu [Kč]	spotřeba drátu [m]	cena spotřeby drátu [Kč]
950	1.1	0,373	355	0,104	464	49
	2.1	0,367	348		460	48
	2.2	0,465	441		566	59
	1.2	0,459	436		561	59
	EN AW 5005	5,633	5352		3395	353
		Σ7,296	Σ6932		Σ5446	Σ566
					celkem	7498 Kč

Tab. 5.2 Celková cena jednotlivých válečků při řezech WEDM

Váleček	Cena [Kč]
1.1	403
2.1	396
2.2	500
1.2	494
EN AW 5005	5705

Rozdíl v ceně válečků Al pěny mezi oblastí s menší pórovitostí a větší pórovitostí je přibližně 100 Kč. Náklady na řez celistvého Al lze považovat za informativní, protože byl tento materiál použit především pro porovnání technologických parametrů a rozdílného chování s řezem v Al pění.

Náklady experimentu řezů Al pěny WEDM byly vyčísleny na **7 498 Kč** a náklady řezů Al pěny na WJM na **180 Kč**. Celkové náklady na opracování činí **7 678 Kč**.

ZÁVĚR

V diplomové práci byla řešena problematika elektroerozivního drátového řezání Al pěny ALPORAS vyrobené metodou práškové metalurgie na Ústavu materiálů a mechaniky strojů SAV v Bratislavě. Cílem bylo zjistit, zda je možné Al pěnu opracovat bez destruktivního upnutí a řezu.

Nejprve bylo nutné stanovit systém upnutí, aby nebyly zdeformovány mezipórové stěny. Posléze byl proveden zkušební řez, přičemž byly určeny parametry řezu. Pro potřeby mechanických zkoušek byly vyřezány 4 válečky $\varnothing 22$ mm v rozích polotovaru za účelem využití co největšího objemu Al pěny.

Pro srovnání řezů byl použita slitina hliníku obdobného chemického složení. Byly porovnány rozměry vyřezaných vzorků, povrchová struktura pod elektronovým mikroskopem, drsnost povrchu celistvého hliníku, závislost pórovitosti pěny na řezu v různých místech, ovlivnění chemického složení na povrchu po řezu.

Z experimentu vyplývá, že technologii elektroerozivního drátového řezání lze považovat za jednu z nejvhodnějších technologií zpracování Al pěny s minimálním destruktivním vlivem při upnutí či samotném řezu v závislosti na příznivé přesnosti výroby.

Touto cestou bych chtěl poděkovat paní Ing. et Ing. Mgr. Janě Petrů, Ph.D., za odborné vedení mé diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat Ústavu materiálů a mechaniky strojů SAV v Bratislavě za svěřenou důvěru pro zpracování Al pěny, Ústavu geoniky akademie věd české republiky za rozbor hliníkové pěny, konkrétně panu Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. Dále pak společnosti RMTVC - výzkumnému programu 2, konkrétně paní doc. Ing. Kateřině Skotnicové, Ph.D. a Ing. Tomáši Čeganovi, Ph.D. za možnost využití strojního vybavení pro zpracování diplomové práce.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MIČIETOVÁ, Anna, Ildikó MAŇKOVÁ a Karol VELÍŠEK. *Top trendy v obrábění*. Žilina: Media/ST, 2007, 232 s. ISBN 978-80-968954-7-2.
- [2] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [3] BILÍK, Oldřich. *Obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002, 71 s. ISBN 80-248-0033-0.
- [4] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Lenka PETŘOVSKÁ a Jana NOVÁKOVÁ. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: VŠB, 2008 [cit. 2015-02-02]. ISBN 978-802-4815-053. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>. Učební text. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [5] DAVIM, J. *Machining composite materials*. London: ISTE ; Hoboken, 2010, xii, 262 s. ISBN 978-1-84821-170-4.
- [6] HOCHENG, Hong a Hung-Yin TSAI. *Advanced analysis of nontraditional machining*. New York: Springer, c2013, vii, 500 s. ISBN 978-1-4614-4053-6.
- [7] SOMMER, Carl. *Non-traditional machining handbook*. 2nd ed. Houston: Advance Publishing, c2009, 391 s. ISBN 978-1-57537-325-6.
- [8] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [9] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II. 2. díl*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 142 s. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [10] Drátové elektrody. *Spotřební materiály pro elektroerozivní stroje* [online]. 2013 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.ua.all.biz/img/ua/catalog/2529616.jpeg>
- [11] Představení centra: Činnost RMTVC. RMTVC [online]. 2013 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.rmtvc.cz/predstaveni-centra>
- [12] *Technické parametry* [online]. 2014 [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: <http://www.chmer.com/products-view.php?id=2>

- [13] Systém upnutí HIRSCHMANN 4000 [online]. 2014 [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: <http://www.hirschmannngmbh.de/en/Reference-systems/Products/Reference-systems/Sinking-EDM/Palletizin-System-4000>
- [14] CHING HUNG MACHINERY & ELETRIC INDUSTRIAL CO., LTD. *CHMER EDM DRÁTOVÁ ŘEZAČKA: Návod k obsluze*. A1. 2007. [cit. 2015-04-26]
- [15] CHING HUNG MACHINERY & ELETRIC INDUSTRIAL CO., LTD. *Wire Cut Cutting Data Manual*. B2. 2008.
- [16] Spektrometr Innov-X Systems Inc., typ Delta Premium [online]. 2012 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://www.bas.cz/innov-x-systems/delta_big.jpg
- [17] SITEK, Libor, Lenka BODNÁRKOVÁ a Kamil SOUČEK. Analysis of inner structure changes of concretes exposed to high temperatures using micro X-ray computed tomography. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2015, s. 79-89. DOI: 10.13168/AGG.2015.0009. Dostupné z: http://www.irms.cas.cz/index_en.php?page=acta_detail_doi
- [18] *Průmyslové mikro rentgenové zařízení XT H 225* [online]. 2010 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.e-tronics.cz/Content/product/img/NIKON/xth225_med.jpg
- [19] KRAR, Stephen F a Arthur GILL. Exploring advanced manufacturing technologies. 1st ed. New York: Industrial Press, c2003, 1 v. (various pagings). ISBN 0831131500.
- [20] QIN, Edited by Yi. Micro-manufacturing engineering and technology. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2010. ISBN 9780815515456.
- [21] TICHÁ, Šárka. 2004. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE: část 1*. Ostrava. Dostupné také z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>. Skripta. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [22] *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Vodítka drátu

Příloha B: Tryska dielektrika

Příloha C: Napájecí karbidový kontakt

Příloha D: Demineralizátor AQUA OSTOMIC O2

Příloha E: Filtry WEDM isto

Příloha F: Deionizační nádoba s pryskyřicí

Příloha G: Systém upnutí HIRSCHMANN 4000

Příloha H: Supermagnety

Příloha I: Tabulka G kódy stroje

Příloha J: Tabulka M kódy stroje

Příloha K: Tabulka velikosti rychlosti posuvů v_f pro Al pěnu

Příloha L: Tabulka stability jiskrové mezery GAP pro Al pěnu

Příloha M: Spektrometr Innov-X Systems Inc., typ Delta Premium

Příloha N: Průmyslové mikro rentgenové zařízení XT H 225

Příloha O: Rozpustnost křemíku v hliníku

Příloha P: SEM QUANTA FEG 450

Příloha Q: Tabulka velikosti rychlosti posuvů v_f pro celistvý Al

Příloha R: Tabulka stability jiskrové mezery GAP pro celistvý Al